

Estudio experimental sobre maqueta de propulsión biomimética.

Trabajo de final de grado



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:
Gabriel Font Mayol

Dirigido por:
Ricard Bosch Tous

Grado en tecnologies marines

Barcelona, 01/07/2018

Departamento de ingeniería eléctrica.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Facultat de Nàutica de Barcelona

Estudio experimental con un mecanismo de propulsión biomimética de aletas verticales.

Hoja de cortesía.

Estudio experimental con un mecanismo de propulsión biomimética de aletas verticales.

Agradecimientos

Este trabajo no hubiese sido posible sin la paciencia y el apoyo de mi tutor Ricard Bosch Tous, cuya ayuda, consejos y experiencia han servido tanto para avanzar en el proyecto como para descubrir que el mundo es mucho mas que la realidad académica.

Agradecer también a mis compañeros y colegas de estudios, ya que solo se llega antes, aunque acompañado se llega mas lejos. En especial, agradecer el apoyo y la ayuda de los verdaderos amigos, gracias por dotar de perspectiva a mis ideas y a saber enfocarlas desde otros prismas, gracias por ayudarme a crecer.

Por último, agradecer a mis padres todo el apoyo, respaldo y confianza depositados en mi durante toda mi vida académica, ya que, sin ellos, sin su apoyo y su amor incondicional, nada hubiese sido posible.

Resumen

En la actualidad existen diferentes sistemas de propulsión alternativos cuyo desarrollo ha se basado en la observación de los animales marinos; como el sistema de propulsión aprovechando la energía de las olas, diseñado por el inventor noruego Einar Jakobsen allá por 1983 cuyo principio se basa en la imitación de la cola de los delfines, o el sistema O-foil creado por la compañía holandesa Marin, sistema que ya puede ser implementado en buques de hasta 110 metros de eslora. Este trabajo tiene como objeto continuar con el desarrollo de un nuevo mecanismo de propulsión alternativo basándose en la observación de los animales marinos y perfeccionándolo mediante la experimentación.

Aprovechando los recursos disponibles en el laboratorio de la ETSEIB (Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona) hemos desarrollado una maqueta impulsada por la fuerza generada mediante una o dos palas colocadas en un plano vertical respecto a la superficie. El encargado de transmitir el movimiento oscilante en las palas es el mecanismo de los limpiaparabrisas de un auto convencional, movido por un motor de 12v c.c.

Durante el desarrollo de este proyecto observamos las fuerzas ejercidas por el mecanismo propulsor, así como las reacciones de este y las fuerzas de arrastre, responsables de movimientos contrarios, o no favorables al avance, como puede ser el cabeceo de la embarcación resultante de la descomposición de fuerzas en las aletas. De la misma manera también analizamos diferentes sistemas externos como el desarrollo de una orza, o la conversión de la maqueta a un trimarán para contrarrestar dichas fuerzas.

Cabe destacar que el mecanismo de limpiaparabrisas no es simétrico, con lo que, a través de los experimentos realizados, podemos llegar a concluir que, para una propulsión con aletas verticales, el ángulo de oscilación de las palas debe de ser inferior al de nuestro mecanismo (90º). Asimismo, que la palada será más eficiente si la dotamos de cierto ángulo en su anclaje.

Este sistema puede ser implementado en embarcaciones con restricciones de calado, o en parques naturales, ya que las turbulencias y vórtices producidos por las palas son mucho menores a los producidos por las hélices convencionales (eliminación del fenómeno de la cavitación), así como los ruidos y vibraciones de esta, desarrollando las bases para otro método de propulsión mucho más eficiente e integrado en su entorno.

Abstract

Nowadays there exist different types of alternative propulsion systems based on the observation of sea animals; like the wave propulsion system, designed by the Norwegian inventor Einar Jakobsen in 1983, whose principle is based on the imitation of the dolphin's tail, or the O-foil propulsion system created in the Netherlands by Marin, which can be used in boats up to 110 meters length. The objective of this project is to continue with the development of new alternative propulsion systems based on the observation of the sea animals and its improvement based on experimentation.

With the resources available at the ETSEIB (Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona) we have developed a prototype propelled by one or two vertical foils. The oscillating movements of these foils are produced by a wiper mechanism with a 12v d.c. motor.

During this project we observed the forces produced by the mechanism as well as the reactions, drag forces and the movements contrary to the vessels proceeding. This way we will study external stability systems like centreboards or the trimaran configuration.

It should be noted that the wiper mechanism is not symmetrical, and through the experimentation we can conclude that, for a vertical foil propulsion system, the oscillating angle of the foils must be lower than 90°. In addition, the foil will be more efficient if it is fitted with a certain angle.

This propulsion system can be used by draught restricted boats or in natural park restricted areas due to its low noise, turbulences and vortex compared with a traditional propeller system, in this case we eliminate the cavitation effect and develop the bases on a new, more efficient and environmentally integrated propulsion system.

Tabla de contenidos

AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
TABLA DE CONTENIDOS	VIII
LISTA DE FIGURAS.	XII
1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Motivación.	1
1.2. Objeto.	1
1.3. Objetivo.	1
1.4. Alcance.	1
2. OBSERVACIÓN MORFOLÓGICA.	2
2.1. Tipos de propulsión.	2
2.1.1. Aletas verticales.	2
2.1.2. Aletas horizontales.	2
2.1.3. Patas palmeadas.	2
2.1.4. Aceleración del fluido.	2
2.1.5. Aletas oscilantes.	2
2.1.6. Momento cinético.	3
2.1.7. Remos.	3
2.1.8. Buceadores.	3
2.1.8.1. Flutter Kiks	3
2.1.8.2. Frog kick	4
2.1.8.3. Cave diver kick	4
2.1.8.4. Single Fin	5
2.2. Resistencia al avance.	6
2.2.1. Secreción de sustancias.	6
2.2.2. Superficies inteligentes.	6
2.2.3. Escamas aletas y crestas.	6
2.2.4. Coeficiente de forma.	7
2.2.5. Superficie frontal.	7
3. ANÁLISIS CINEMÁTICO.	8

3.1. Oscilación aletas.	8
3.2. Propulsión a chorro.	10
4. DECISIONES CONSTRUCTIVAS.	11
4.1. Propulsor.	11
4.1.1. Aletas horizontales.	11
4.1.2. Aletas verticales.	13
4.1. Plataforma.	14
4.2. Posición del propulsor.	14
4.2.1. Prueba de estabilidad.	15
4.2.1.1. Objetivo.	15
4.2.1.2. Entorno y condiciones.	15
4.2.1.3. Equipo necesario.	15
4.2.1.4. Estabilidad inicial.	16
4.2.1.5. Carga en las fijaciones.	17
4.2.1.6. Carga en los extremos.	22
4.2.1.7. Conclusiones.	23
5. DIMENSIONAMIENTO.	24
5.1. Reservas de flotabilidad (I).	24
5.1.1. Geometría.	24
5.1.2. Cálculos.	24
5.1.3. Elección	25
5.2. Reservas de flotabilidad (II)	25
5.2.1. Flotabilidad (I).	26
5.2.2. Geometría.	27
5.2.2.1. Centro de carena.	28
5.3. Reserva de flotabilidad pasiva.	29
5.4. Reservas de flotabilidad (III).	29
6. CONSTRUCCIÓN.	31
6.1. Estructura.	31
6.2. Aletas(I).	31
6.3. Aletas(II).	32
6.4. Aletas (III).	33
6.5. Reservas de flotabilidad (I).	33
6.6. Reservas de flotabilidad (II).	35

6.7. Reserva de flotabilidad pasiva.	36
6.8. Reservas de flotabilidad (III).	37
7. PRUEBAS MAQUETA.	38
7.1. Ensayo 1.	38
7.1.1. Condiciones del ensayo.	38
7.1.2. Material utilizado.	38
7.1.3. Preparativos.	38
7.1.3.1. Observaciones.	39
7.1.4. Ensayos.	39
7.1.4.1. Reservas atrasadas, por debajo de la flotación del esquí.	39
7.1.4.2. Reservas adelantadas, en la flotación del esquí.	40
7.1.4.3. <i>Reservas adelantadas, por debajo de la flotación del esquí.</i>	41
7.1.5. Observaciones.	41
7.1.5.1. Flotabilidad	41
7.1.5.2. Dinámica (Cabeceo).	43
7.1.5.2.1. Momento en el mecanismo.	44
7.1.5.2.2. Momentos en las palas y momento resultante total.	44
7.1.6. Puntos a mejorar.	45
7.1.6.1. Sujeción de la maqueta.	45
7.1.6.2. Sujeción de las palas.	45
7.1.6.3. Reservas de flotabilidad y dinámica de la maqueta.	45
7.2. Ensayo 2.	46
7.2.1. Condiciones del ensayo.	46
7.2.2. Material utilizado.	46
7.2.3. Modificaciones.	46
7.2.4. Observaciones.	46
7.2.4.1. Primera puesta a flote.	46
7.2.4.2. Situación estática.	47
7.2.4.3. Situación dinámica.	47
Cabeceo del patín.	47
Escora dinámica.	47
7.2.5. Mejoras.	48
7.2.5.1. Mejoras alcanzadas.	48
7.2.5.2. Futuras mejoras.	48
7.3. Ensayo 3.	48
7.3.1. Condiciones del ensayo.	48
7.3.2. Material utilizado.	49
7.3.3. Modificaciones.	49
7.3.4. Primeras impresiones.	49
7.3.4.1. Condición estática.	49
7.3.4.2. Condición dinámica.	50
7.3.5. Prueba con las dos palas avanzadas.	50
7.3.5. Prueba con la pala de estribor.	51
7.3.6. Prueba con la pala de babor.	51
7.3.7. Prueba con la pala de babor en el centro.	52
8. CONCLUSIONES.	53

8.1.	Ángulo recorrido por la pala.	53
8.2.	Anclaje de las palas.	54
8.3.	Futuras vías de investigación.	54
9.	SÍNTESIS DEL PROCESO CONSTRUCTIVO.	55
9.1.	Observación.	55
9.2.	Sistema.	56
9.3.	Plataforma.	56
9.4.	Primer diseño.	57
9.5.	Ensayo 1.	57
9.6.	Observaciones y mejoras.	57
9.7.	Ensayo 2.	58
9.8.	Observaciones y mejoras (II).	58
9.9.	Ensayo 3.	58
10.	BIBLIOGRAFÍA.	59
11.	WEBGRAFÍA.	59
	ANEXO 1: DISEÑOS ANTERIORES.	60
A1.1.	Primer diseño.	60
A1.2.	Segundo diseño.	61

Lista de figuras.

ILUSTRACIÓN 1: SIMILITUD ZAPATEROS Y BOTE 4 SIN	3
ILUSTRACIÓN 2: PATADA OSCILANTE CON UNA ALETA DIVIDIDA. FUENTE: HTTP://WWW.ALERTDIVER.COM	4
ILUSTRACIÓN 3: PATADA DE RANA. FUENTE: HTTP://WWW.SWIMTEACHING.COM	4
ILUSTRACIÓN 4: TÉCNICA DE BUCEO EN CUEVAS. FUENTE: HTTP://WWW.TRAVELRIVIERAMAYA.COM.	5
ILUSTRACIÓN 5: TÉCNICA PARA EL MOVIMIENTO MONO-ALETA. FUENTE: WWW.SCIENCEDIRECT.COM.	5
ILUSTRACIÓN 6: DISTRIBUCIÓN DE LAS ESCAMAS EN UN TIBURÓN. FUENTE: J.J. VIDELER	7
ILUSTRACIÓN 7: COEFICIENTES DE FRICCIÓN PEZ ESPADA. FUENTE: J.J. VIELDER.	8
ILUSTRACIÓN 8. FUENTE PROPIA	8
ILUSTRACIÓN 9. FUENTE PROPIA	9
ILUSTRACIÓN 10. FUERZAS DE ACCIÓN Y REACCIÓN EN EL AVANCE DE UN CALAMAR.	11
ILUSTRACIÓN 11: MECANISMO ALETA HORIZONTAL. FUENTE PROPIA.	12
ILUSTRACIÓN 12: SECUENCIA MOVIMIENTOS. FUENTE PROPIA	13
ILUSTRACIÓN 13: RELACIÓN MOVIMIENTO DE LA BIGA 3 EN FUNCIÓN DEL RADIO 1. FUENTE PROPIA.	13
ILUSTRACIÓN 14: MECANISMO UTILIZADO.	14
ILUSTRACIÓN 15: ESQUÍ CON EL SOPORTE INCORPORADO.	14
ILUSTRACIÓN 16: ESCENARIO PRUEBA DE FLOTABILIDAD.	15
ILUSTRACIÓN 17: EQUIPO PARA LA PRUEBA DE FLOTABILIDAD.	16
ILUSTRACIÓN 18: FLOTACIÓN INICIAL DEL ESQUÍ.	16
ILUSTRACIÓN 19: 1KG CENTRO – PROA	17
ILUSTRACIÓN 20: 1KG CENTRO	18
ILUSTRACIÓN 21: 1KG CENTRO – POPA	18
ILUSTRACIÓN 22: 2KG CENTRO – PROA	19
ILUSTRACIÓN 23: 2 KG CENTRO.	20
ILUSTRACIÓN 24: 2 KG CENTRO – POPA	21
ILUSTRACIÓN 25: ESTABILIDAD DEL PATÍN CON 3KG.	22
ILUSTRACIÓN 26: ESTABILIDAD PATÍN CON EL PESO APROADO.	23
ILUSTRACIÓN 27: ESTABILIDAD DEL PATÍN CON EL LASTRE LO MÁS APOADO POSIBLE.	23
ILUSTRACIÓN 28: SOBREDIMENSIONAMIENTO DE LAS RESERVAS ESFÉRICAS.	25
ILUSTRACIÓN 29: GEOMETRÍA DE LA NUEVA RESERVA DE FLOTABILIDAD.	26
ILUSTRACIÓN 30: COMPARACION DE LA ESTABILIDAD CON LA POSICIÓN RELATIVA DE LAS RESERVAS DE FLOTABILIDAD.	28
ILUSTRACIÓN 31: DETERMINACIÓN DEL CENTRO DE CARENA TEÓRICO.	28
ILUSTRACIÓN 32: REPRESENTACIÓN DE FUERZAS Y MOMENTOS. FUENTE PROPIA.	29
ILUSTRACIÓN 33: SECCIÓN DE LOS TROZOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO UTILIZADOS.	30
ILUSTRACIÓN 34: MOMENTOS RESULTANTES EN LA MAQUETA. FUENTE PROPIA.	30
ILUSTRACIÓN 35: SUJECIÓN DE LA ESTRUCTURA.	31
ILUSTRACIÓN 36: SOLUCIÓN PARA SUJETAR LAS ALETAS.	31
ILUSTRACIÓN 37: SUJECIÓN DE LAS PALAS DE ALUMINIO.	32
ILUSTRACIÓN 38: COMPARACIÓN DE LOS DISTINTOS MODOS DE SUJECIÓN.	32
ILUSTRACIÓN 39: PUNTO DE ROTURA.	33
ILUSTRACIÓN 40: NUEVOS PUNTOS DE SUJECIÓN DE LAS ALETAS.	33
ILUSTRACIÓN 41: RESERVAS DE FLOTABILIDAD ESFÉRICAS Y SU COLOCACIÓN.	34
ILUSTRACIÓN 42: CONSTRUCCIÓN DE LA ORZA.	35
ILUSTRACIÓN 43: SUJECIÓN DE LA ORZA.	35
ILUSTRACIÓN 44: CONSTRUCCIÓN DE LA RESERVA DE FLOTABILIDAD PASIVA.	36
ILUSTRACIÓN 45: SUJECIÓN DE LA RESERVA DE FLOTABILIDAD PASIVA.	36
ILUSTRACIÓN 46: UNIÓN DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO CON LAS DOS VARILLAS DE MÉTRICA 8.	37
ILUSTRACIÓN 47: VISTA TRASERA DEL CONJUNTO (IZQ.) Y LA UNIÓN DE LAS VARILLAS (DCHA.)	37
ILUSTRACIÓN 48: APOYO DE LA MAQUETA FUERA DEL AGUA.	38

ILUSTRACIÓN 49: CONDICIONES ESTÁTICA (ARRIBA) Y DINÁMICA (ABAJO) CON LAS RESERVAS ATRASADAS POR DEBAJO DE LA FLOTACIÓN DEL ESQUÍ	39
ILUSTRACIÓN 50: MAQUETA ESTÁTICA CON LAS RESERVAS ADELANTADAS EN LA FLOTACIÓN DEL ESQUÍ.	40
ILUSTRACIÓN 51: SITUACIÓN ESTÁTICA DE LA MAQUETA CON LAS RESERVAS ADELANTADAS POR DEBAJO DE LA FLOTACIÓN DEL ESQUÍ.	41
ILUSTRACIÓN 52: SITUACIÓN ESTÁTICA DE LA MAQUETA CON LAS RESERVAS DE FLOTABILIDAD ESFÉRICAS.	42
ILUSTRACIÓN 53: COMPORTAMIENTO ESTÁTICO (ARRIBA) Y DINÁMICO (ABAJO) CON LAS RESERVAS DE FLOTABILIDAD DEBAJO DEL CENTRO DE GRAVEDAD.	43
ILUSTRACIÓN 54: MOMENTOS GENERADOS POR EL MECANISMO LIMPIA PARABRISAS.	44
ILUSTRACIÓN 55: FUERZAS EN LAS PALAS.	44
ILUSTRACIÓN 56: MOMENTOS RESULTANTES DE LAS FUERZAS EN LAS PALAS.	45
ILUSTRACIÓN 57: PRIMERA PUESTA A FLOTE CON LA ORZA.	47
ILUSTRACIÓN 58: ESCORA HACIA BABOR DEBIDA AL ÁNGULO DE LA PALA.	48
ILUSTRACIÓN 59: FLOTACIÓN DE LA MAQUETA EN CONDICIONES ESTÁTICAS.	50
ILUSTRACIÓN 60: ANCLAJE BABOR (IZQ) Y ANCLAJE ESTRIBOR (DCHA).	51
ILUSTRACIÓN 61: DIFERENCIAS DE INCLINACIÓN EN LAS PALAS DEBIDAS A LOS ÁNGULOS DE ANCLAJE.	52
ILUSTRACIÓN 62: DISPOSICIÓN CENTRAL DE LA PALA DE BR.	53
ILUSTRACIÓN 63: MECANISMO ALTERNATIVO DE ALETAS VERTICALES.	55
ILUSTRACIÓN 64: MECANISMO PARA LA PROPULSIÓN CON ALETA HORIZONTAL.	56
ILUSTRACIÓN 65A: PRIMER DISEÑO.	60
ILUSTRACIÓN 66A: SEGUNDO DISEÑO.	61

1. Introducción.

1.1. Motivación.

Los métodos de propulsión convencionales parecen tener un límite en cuanto a eficiencia, ya que, como en el caso de las hélices, estas producen cavitación, vibraciones y ruidos.

Parece inevitable pensar que debe de haber otro método mucho más eficiente y simple, y que si observamos la naturaleza podemos obtener alguna respuesta. La principal motivación para este trabajo es la de experimentar con principios muy simples hallados en la naturaleza, como la propulsión mediante aletas, a chorro o movimiento cinético e implementarlas en un escenario real para obtener unas bases para el desarrollo de nuevos métodos para la propulsión de embarcaciones.

1.2. Objeto.

En este trabajo resumimos la construcción y prueba de una maqueta propulsada mediante aletas verticales. Esta maqueta tiene como base un esquí acuático y como elemento propulsor a un mecanismo de limpiaparabrisas, aunque la maqueta es más que estos dos elementos, ya que para que el conjunto pueda navegar y mantenerse a flote, requiere de diferentes elementos de estabilidad como orzas o patines, convirtiendo el montaje final en un trimarán propulsado por una o dos aletas verticales.

1.3. Objetivo.

El objetivo de este trabajo es el de construir una maqueta con la que realizar diferentes ensayos relativos a la propulsión biomimética, y que para el final de estos los comportamientos de la maqueta estén definidos, donde no quepa lugar a más mejoras del prototipo sin tener que modificar notablemente su distribución original.

1.4. Alcance.

Ya existen diferentes mecanismos de propulsión biomimética, aunque ninguno mediante aletas verticales, y aunque al principio del proyecto aún no estaba claro con qué tipo de distribución trabajaríamos (si aletas verticales u horizontales), durante el desarrollo del proyecto hemos establecido unas bases para el comienzo y el futuro desarrollo de nuevos mecanismos de propulsión mediante aletas verticales.

2. Observación morfológica.

2.1. Tipos de propulsión.

2.1.1. Aletas verticales.

Comúnmente encontrada en los peces. La propulsión de estos se desarrolla mediante el movimiento en el plano horizontal de la zona caudal. En la teoría, su propulsión es simple; el desplazamiento de la zona caudal a izquierdas y derechas con el fin de desplazar un cierto volumen de agua hacia atrás para conseguir su reacción opuesta, genéricamente, cuanto mayor sea el pez, más rápido podrá propulsarse.

2.1.2. Aletas horizontales.

Observadas en mamíferos marinos en todas sus órdenes (cetáceos, sirenios, pinnípedos, nutrias, etc.).

Si la aleta caudal estuviese dispuesta en el mismo plano que la nadadera de los peces, estos perderían una gran superficie útil cada vez que tuvieran que emerger a la superficie, gastando más energía y por consiguiente siendo menos eficientes. De esta manera deduciremos que los animales marinos cuyo sistema de propulsión se encuentra cercano a la superficie tienen dispuestas sus aletas caudales en un plano horizontal

2.1.3. Patas palmeadas.

Principal característica de las aves marinas, las cuales disponen de unas membranas interdigitales con la finalidad de aumentar su coeficiente de forma en la fase de propulsión.

Durante la natación, los movimientos de las patas son prácticamente los mismos que cuando andan, con la única diferencia que, cuando dirigen la pata hacia adelante para reanudar la propulsión, los dedos se pliegan con el fin de ofrecer una resistencia menor al avance.

Generalmente las patas se mueven de una manera alternada salvo cuando es necesario avanzar rápidamente, en este caso el ave es propulsada con las dos patas simultáneamente. Los cambios de dirección se realizan mediante unos movimientos diferenciales de las patas.

2.1.4. Aceleración del fluido.

Característica de las ranas y cefalópodos, estos dos grupos de animales, aunque diferentes, comparten un mecanismo de propulsión bastante parecido, ya que los dos se basan en las fuerzas relativas a la aceleración repentina del fluido; es decir, propulsión a chorro. Mientras en los cefalópodos la propulsión se realiza mediante la contracción repentina del manto expulsado rápidamente el agua por la cavidad paleal, en las ranas tiene una forma un poco más simple; dotando a sus piernas mediante movimientos de rotación y traslación con el fin de conseguir el mismo efecto que en los cefalópodos. Cabe destacar que, en las ranas, al contrario que en los cefalópodos, se observa una estela turbulenta muy característica resultante del movimiento de las patas palmeadas.

2.1.5. Aletas oscilantes.

Propulsión utilizada por las tortugas marinas generando un movimiento de translación – rotación con sus aletas con el fin de impulsar la mayor cantidad de agua posible en el sentido opuesto al avance.

2.1.6. Momento cinético.

Propulsión muy característica en el grupo bacilo, cuya amplitud de movimiento del cuerpo es muy grande si lo comparamos con el resto de los animales marinos. Para este tipo de propulsión, el animal se encarga de transmitir un movimiento de rotación al fluido, en este caso el agua, esto genera un momento cinético que tiene como resultante la fuerza de avance.

2.1.7. Remos.

Utilizado por los insectos que se sirven de la tensión superficial para sostenerse encima del agua, los Zapateros. Estos transfieren su movimiento al fluido, en sus capas inferiores a la superficie, a través de vórtices hemisféricos producidos por sus patas propulsoras, es decir, de una manera muy parecida a la que lo haría un bote 4 sin en una regata.

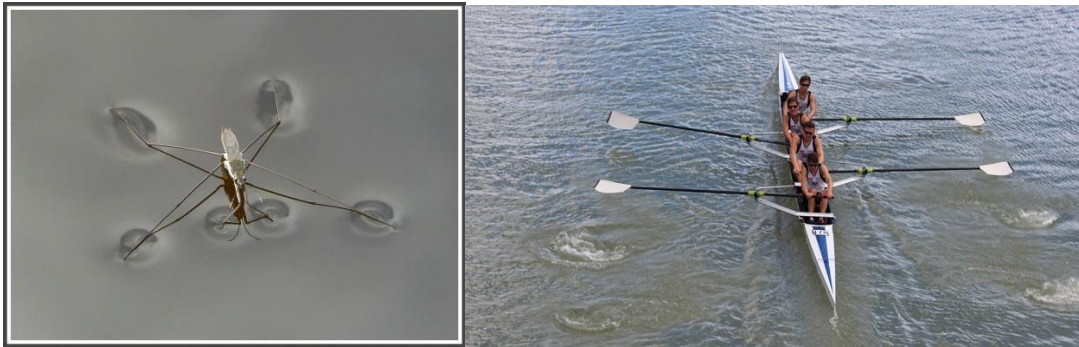


Ilustración 1: Similitud zapateros y bote 4 sin

2.1.8. Buceadores.

Existen diversas técnicas de buceo adaptadas a diferentes circunstancias como por ejemplo la propulsión en aguas someras, el buceo en cuevas, etc. A continuación, narraremos diferentes técnicas relativamente básicas para el buceo, que hemos observado con el fin de comprender los movimientos involucrados y cómo podemos sacarle provecho.

2.1.8.1. Flutter Kicks

Patadas oscilantes por su traducción en español. Esta es la técnica más usada y a la vez más simple. Es una de las técnicas más sólidas y genera una gran propulsión, su mayor ventaja es la gran fuerza generada por los movimientos verticales ascendentes y descendentes de las piernas y no requiere una técnica excesivamente depurada.

Desde un punto de vista biomimético es una técnica fácil de replicar si nos centramos únicamente en el movimiento del pie con respecto a las piernas; ya que este podría semejarse al movimiento de una rótula unida a una guía.

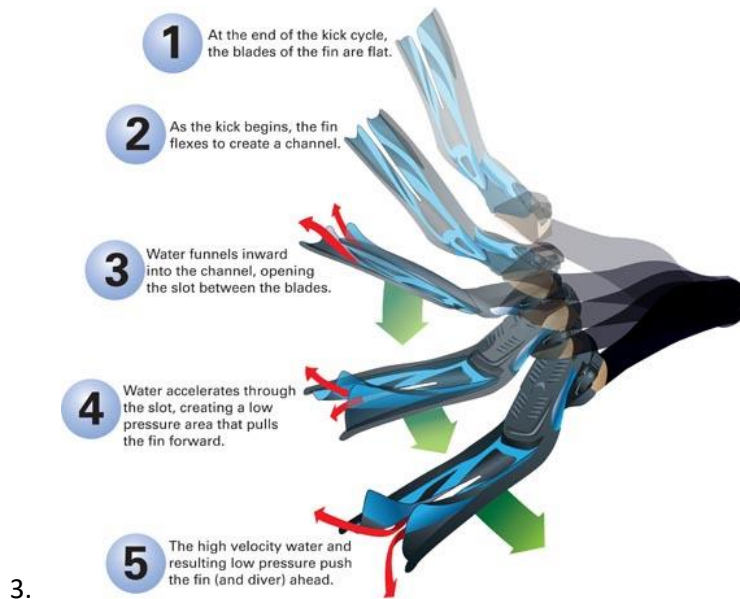


Ilustración 2: Patada oscilante con una aleta dividida. Fuente: <http://www.alertdiver.com>

2.1.8.2. Frog kick

Traducido como “Patadas de Rana”, a diferencia del anterior este es un movimiento horizontal, comúnmente utilizado cuando el buceador se encuentra próximo a la superficie y más eficiente que las patadas oscilantes. Este método pretende imitar al de las aves marinas cuando requieren de una mayor propulsión utilizando ambas patas, como ya hemos observado anteriormente.

Desde un punto de vista biomimético es mucho más difícil de replicar, ya que sus movimientos son muy complejos al involucrar toda la pierna junto a las rodillas para su ejecución.

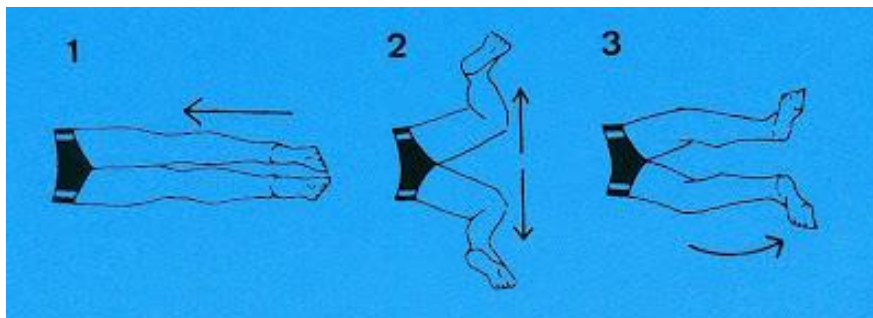


Ilustración 3: Patada de rana. Fuente: <http://www.swimteaching.com>

2.1.8.3. Cave diver kick

Técnica utilizada comúnmente para el buceo en cuevas ya que este no genera turbulencias próximas al fondo. El movimiento es muy parecido a las patadas oscilantes con la diferencia que hay que realizarlo con las rodillas flexionadas manteniendo los pies por encima de estas, mientras que la gran parte del movimiento es generado por la oscilación de los tobillos.

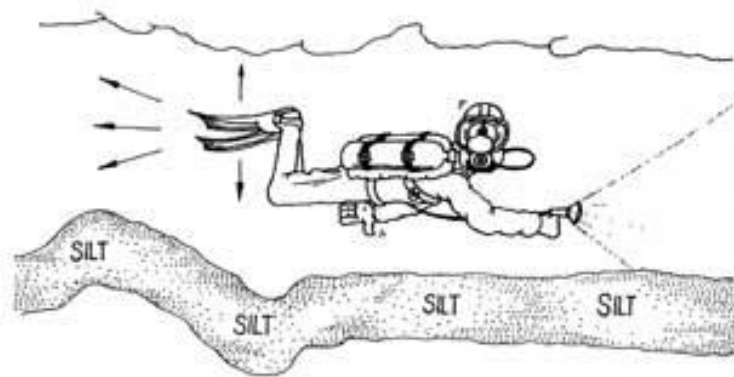


Ilustración 4: Técnica de buceo en cuevas. Fuente: <http://www.travelrivieramaya.com>.

También sería fácilmente replicable mediante algún mecanismo oscilante unido a una aleta o aletas.

2.1.8.4. Single Fin

Técnica de buceo donde se utiliza únicamente una aleta unida a los dos pies. Existen una gran cantidad de estudios biomecánicos destinados a optimizar el movimiento del buceador para que el movimiento sea lo más eficiente posible. El movimiento se realiza mediante la acción del pecho, cintura rodillas y tobillos. Desde un punto de vista técnico es uno de los más complejos y cuya técnica cuesta más de depurar.

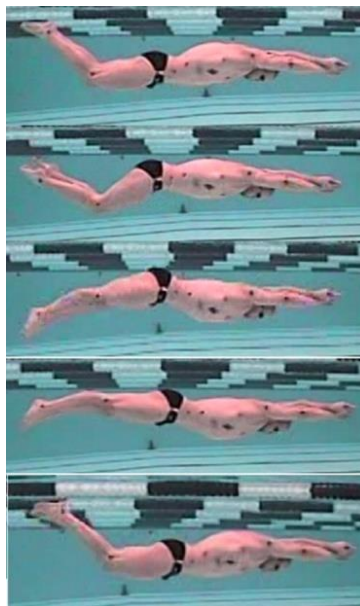


Ilustración 5: Técnica para el movimiento mono-aleta. Fuente: www.sciencedirect.com.

Si nos centramos únicamente en el movimiento que realiza el tobillo, observaremos que este se mueve verticalmente, debido a los movimientos que lo preceden de las rodillas cintura y cuerpo, y a la vez dota de rotación a los pies con respecto a las piernas para completar el movimiento. Basándonos en esta descomposición obviando los movimientos del cuerpo, al no ser estos influyentes en la propulsión, podemos construir una maqueta relativamente simple que aproxime dicho movimiento.

2.2. Resistencia al avance.

2.2.1. Secreción de sustancias.

En muchas especies de peces es común la existencia de células mucosas. Estas células son las encargadas de segregar mucopolisacáridos fibrosos, que en contacto con el agua forman una capa mucosa alrededor del pez. Esta capa mucosa aparte de encargarse de proteger el pez frente a ataques bacterianos, reducir el riesgo de arañazos y protegerlo frente a algunos depredadores, también se encarga de reducir el coeficiente de fricción.

Esta reducción del coeficiente de fricción debida al efecto de los polímeros añadidos al fluido se conoce como el efecto Toms. Toms (1948) descubrió que al añadir una pequeña cantidad de polímeros a un flujo turbulento (alto número Re) en el interior de una tubería, se reducía la caída de presión substancialmente.

Si añadimos un 5% de solución mucosa segregada por la barracuda del pacífico en agua de mar, nos reduce el coeficiente de fricción en un 66%.

2.2.2. Superficies inteligentes.

Algunos animales marinos tienen la capacidad de alterar tanto la forma como la temperatura de su piel con el fin de reducir la fricción en el agua.

Kramer (1960) sugirió que la piel de los delfines, al deformarse, es capaz de reducir las pulsaciones de presión por medio de la deformación elástica. De esta manera se mantiene el patrón de flujo laminar por encima del número crítico de Reynolds.

De igual manera, al incrementar la temperatura del fluido, reducimos los efectos viscosos y por ende disminuimos el coeficiente de fricción. Este truco se cree potencialmente posible en algunos mamíferos de sangre caliente.

2.2.3. Escamas aletas y crestas.

La investigación en la reducción del coeficiente de arrastre en aeronaves mostro que la implementación de pequeñas crestas longitudinales de una geometría en particular reduce el coeficiente de arrastre en condiciones de régimen turbulento. Se demostró que la reducción del coeficiente de arrastre depende de la altura y el espaciado de las crestas en relación al número de Reynolds local. De esta manera, observaremos que los tiburones están recubiertos de escamas cuyos diámetros varían entre 0.2 y 0.5mm en función de la posición que ocupan en el animal. En la siguiente figura se muestra la distribución de las escamas en función del flujo incidente en cada parte de un tiburón de los galápagos (*Carcharhinus galapagensis*).

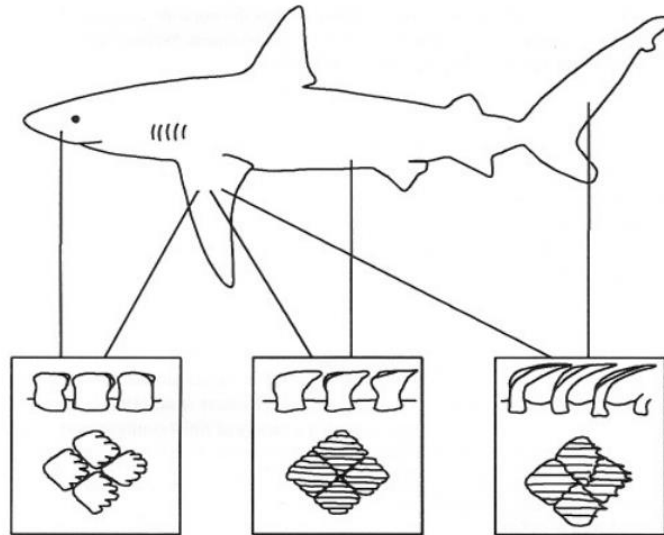


Ilustración 6: Distribución de las escamas en un tiburón. Fuente: J.J. Videler

2.2.4. Coeficiente de forma.

Como hemos citado anteriormente, las aves marinas varían el coeficiente de forma de sus patas plegándolas cuando estas retroceden. Esto es muy significativo, ya que la relación entre el coeficiente de arrastre en una superficie plana y una cóncava es de 1 a 4. Extrapolando esta afirmación podemos decir que las patas de las aves marinas cuando se encuentran abiertas (impulsando) ofrecen 4 veces más resistencia que cuando se encuentran en el retroceso.

2.2.5. Superficie frontal.

Otra característica fundamental a observar en los animales marinos, es la forma que tienen estos de 'penetrar' el agua; ya que no es lo mismo deslizar la mano horizontalmente dentro del agua que verticalmente.

Un ejemplo muy ilustrativo de como varía el coeficiente de arrastre en función de la superficie de incidencia sería el pez espada. A parte de utilizar este característico apéndice para cazar y defenderse, este, también le ayuda a disminuir su fricción en el agua.

A continuación se representa la distribución del coeficiente de presión dinámica sobre la superficie de un pez espada a través de las superficies dorsales (D), ventrales (V) y laterales (L).

Las líneas de puntos muestran los valores para el mismo modelo pero sin la espada frontal:

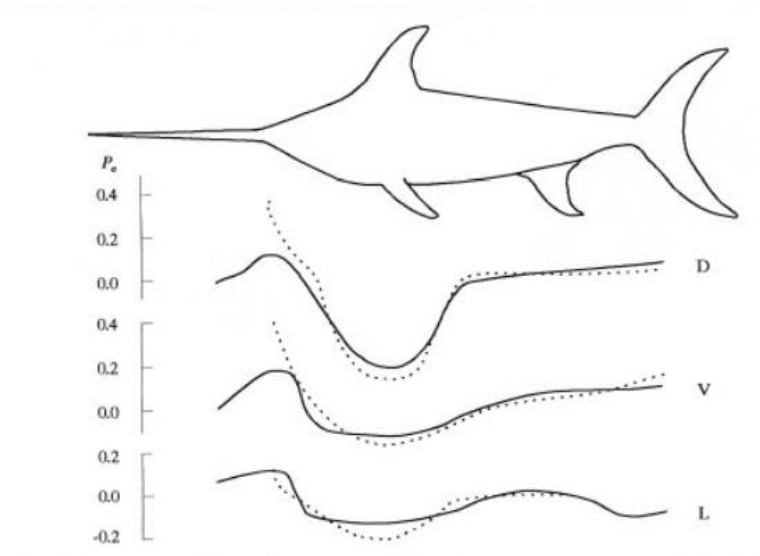


Ilustración 7: Coeficientes de fricción pez espada. Fuente: J.J. Vielder.

3. Análisis cinemático.

3.1. Oscilación aletas.

Simplificaremos el modelo de propulsión mediante aletas en una aleta rígida de un determinado radio y cuya oscilación varía entre dos ángulos iguales (Ilustración 9)

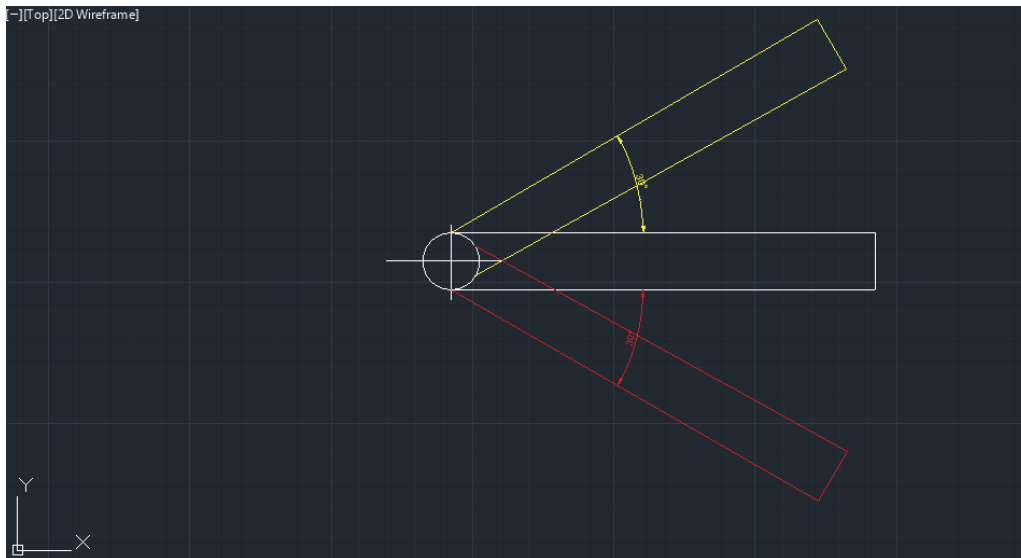


Ilustración 8. Fuente Propia

La fuerza que ejerce la pala sobre el fluido es el resultado de desplazar una cierta cantidad de agua a una cierta velocidad, es decir:

$$F = \dot{m} \times v$$

Donde: $\dot{m} = \rho AV$; de manera que la fuerza ejercida por la pala puede representarse como:

$$F = \rho AV^2$$

Dependiendo esta de la densidad del fluido, el área de la pala y el cuadrado de la velocidad a la que el agua es desplazada.

La parte de la pala que trabajará, dependerá de la dirección de esta. La fuerza en la cara efectiva de la pala podrá descomponerse en los triángulos siguientes (ilustración 10).

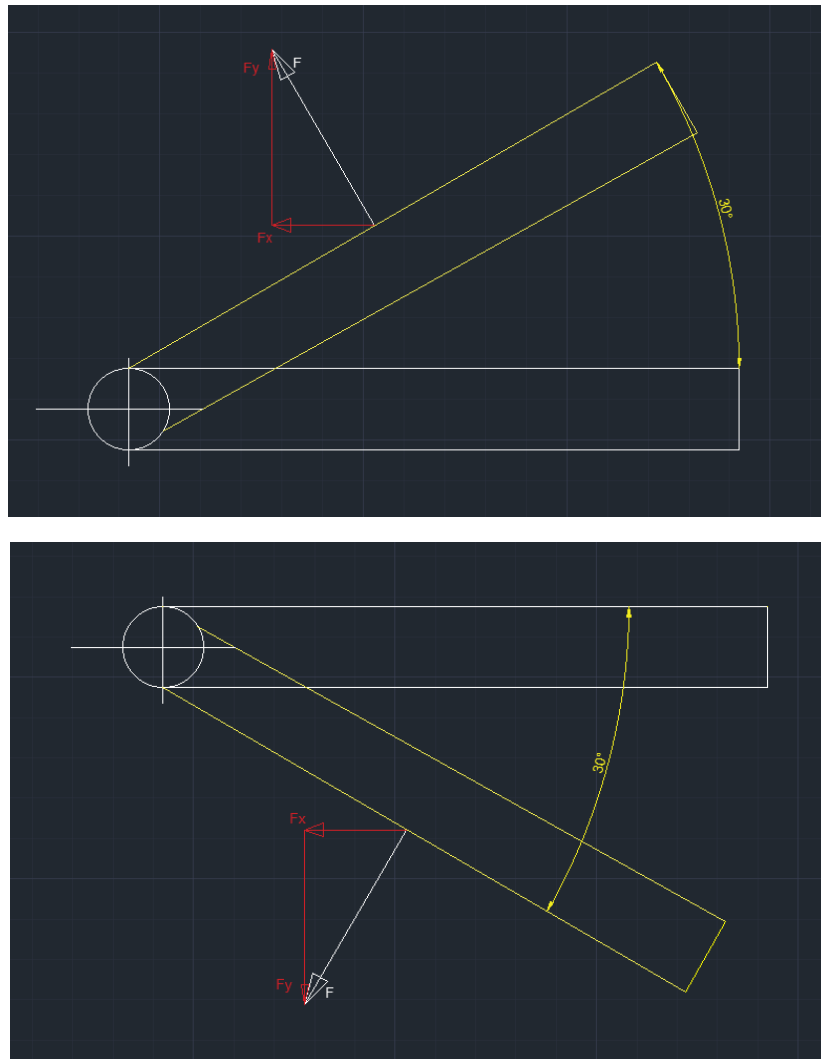


Ilustración 9. Fuente propia

La fuerza que realiza la pala tiene dos componentes, uno horizontal (F_x) y el otro vertical (F_y). La componente vertical, cambia en ambos casos de sentido, proporcionando una resultante ascendente cuando la pala sube, y descendente cuando la pala está bajando. Mientras que la componente horizontal (F_x) tiene la misma dirección sin importar la dirección de la pala.

$$F_1 = \sqrt{F_{1x}^2 + F_{1y}^2}; \begin{cases} \overrightarrow{F_{1x}} = -\rho AV^2 \sin \alpha \\ \overrightarrow{F_{1y}} = \rho AV^2 \cos \alpha \end{cases}$$

$$F_2 = \sqrt{F_{2x}^2 + F_{2y}^2}; \begin{cases} \overrightarrow{F_{2x}} = -\rho AV^2 \sin \alpha \\ \overrightarrow{F_{2y}} = -\rho AV^2 \cos \alpha \end{cases}$$

De modo que podemos deducir que la componente útil para propulsar una embarcación, por ejemplo, es F_x y que cuanto mayor sea el ángulo de inclinación de la pala mayor será esta componente, decreciendo a la vez F_y .

Para determinar la potencia proporcionada por este propulsor, la única componente útil, entendiendo que nos desplazamos en un plano horizontal, es F_x .

Sabemos que la potencia realizada es la fuerza ejercida en una unidad de tiempo, de manera que:

$$P = F \times V;$$

$$P_{\text{útil}} = \overline{F_x} \times v ;$$

$$P_{\text{útil}} = -\rho A V^3 \sin \alpha.$$

Al determinar la componente útil para la propulsión también podemos deducir cual es el movimiento útil de la pala, en este caso, cuando mayor sea en ángulo de nuestra pala, mayor será su componente horizontal.

3.2. Propulsión a chorro.

Este tipo de propulsión encontrada tanto en los cefalópodos como en las ranas, es la materialización más clara de la 3ª ley de Newton, la cual establece que: “Siempre que un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo ejerce una fuerza de igual magnitud y dirección opuesta sobre el primero” es decir, a cada acción le corresponde una reacción igual y opuesta. De manera que un calamar para moverse debe realizar una fuerza mayor o igual a la de su peso para empezar a moverse, esta fuerza multiplicada por el tiempo que tardamos en aplicarla se conoce como impulso, medido en N*s (S.I).

$$\text{Impulso} = \text{Fuerza} * \text{Tiempo}$$

Al aplicar un impulso a un cuerpo, en la mayoría de los casos, estamos variando su cantidad de movimiento, pudiendo afirmar que:

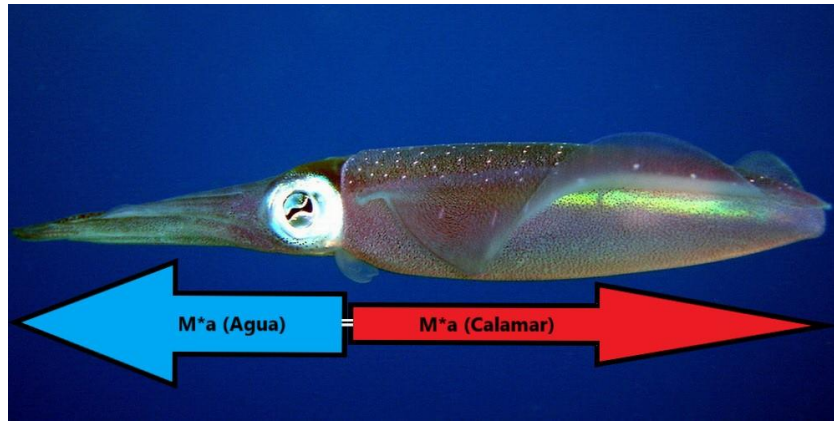
$$P = m * v$$

Donde ‘P’ es la cantidad de movimiento, ‘m’ la masa del objeto y ‘v’ su velocidad.

Otra relación que podemos encontrar entre el impulso y la cantidad de movimiento es que, la aceleración que un cuerpo toma es directamente proporcional a la fuerza que se le aplica e inversamente proporcional a la masa del mismo, es decir:

$$F = m * a$$

De esta manera deduciremos que para que nuestro calamar consiga la fuerza necesaria para moverse, deberá acelerar hasta cierto punto una cierta cantidad de agua en relación a su peso y coeficiente de fricción.



Il·lustració 10. Forces de acció i reacció en el avançe de un calamar.

4. Decisiones constructivas.

4.1. Propulsor.

En la observación de los distintos animales marinos y su propulsión podemos concluir lo siguiente:

Tipo de propulsión	Entorno	Facilidad biomimética*
Aletas verticales	Superficial/No superficial	Alta
Aletas horizontales	Superficial/No superficial	Alta
Patas palmeadas	Superficial	Baja
Aceleración del fluido	No superficial	Baja
Aletas oscilantes	Superficial	Baja
Movimiento cinético	Superficial/No superficial	Baja

Tabla 1: Tipos de propulsión de los animales marinos.

*Facilidad con la que podemos replicar el movimiento con nuestros conocimientos y recursos.

En la tabla de conclusiones no se han incluido a los buceadores ya que el movimiento que estos realizan es una simplificación de los movimientos en los animales marinos con aletas horizontales.

4.1.1. Aletas horizontales.

El propulsor que se pretende desarrollar está destinado a embarcaciones que se mueven por la superficie, de modo que el entorno de trabajo será superficial. Basándonos en esta condición y por la alta facilidad biomimética, decidiremos imitar el movimiento de las aletas horizontales.

Para imitar este movimiento definiremos el siguiente mecanismo:

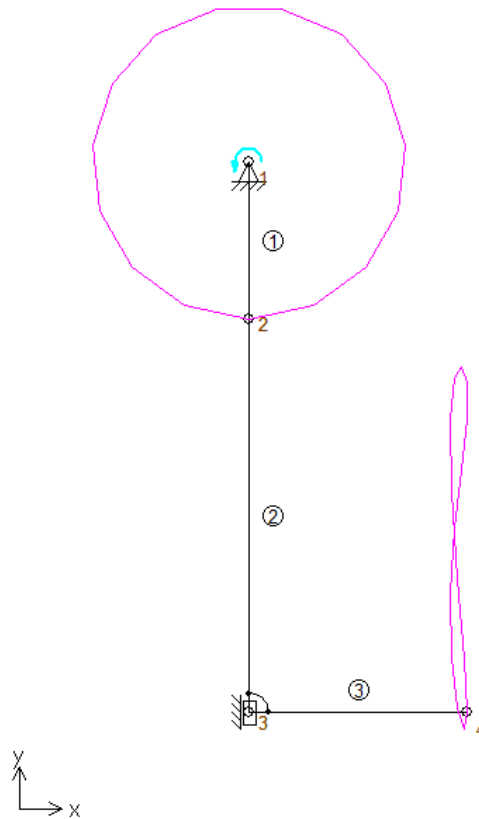


Ilustración 11: Mecanismo aleta horizontal. Fuente propia.

Este mecanismo se compone de 4 nodos unidos por tres bigas con las siguientes características:

- Movimiento de entrada angular en el nodo 1 (fijo).
- Nodo 2 como articulación.
- Nodo 3 fijado en el plano vertical.
- Angulo fijo en la biga 3-4.

La biga 1-2 junto con el movimiento angular en el nodo 1 dan como resultante un movimiento circular en el nodo 2, pudiendo substituir la biga 1-2 por una rueda o engranaje, donde el radio vendrá determinado por la distancia 1-2, en la que le fijaremos la biga 2-3 en uno de sus extremos.

La biga 3-4 realiza un movimiento muy parecido al de una aleta horizontal, siendo este más exagerado cuanto mayor sea el radio 1-2.

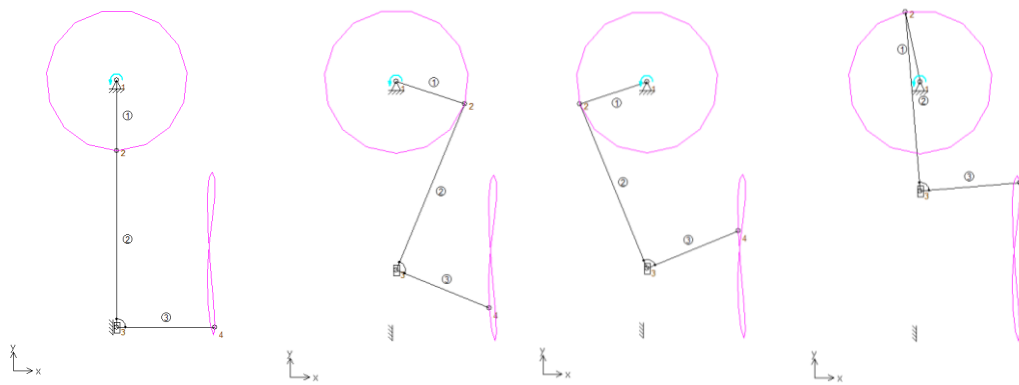


Ilustración 12: Secuencia movimientos. Fuente propia

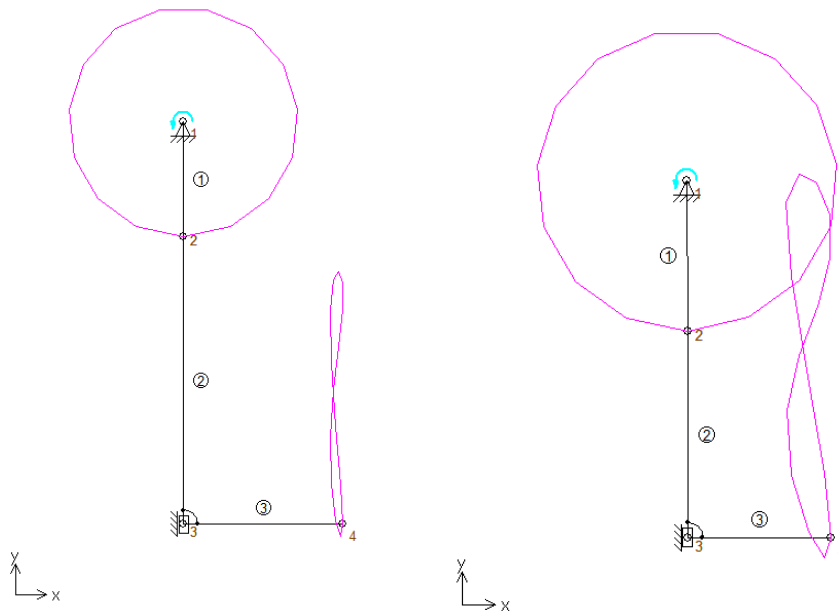


Ilustración 13: Relación movimiento de la biga 3 en función del radio 1. Fuente propia.

4.1.2. Aletas verticales.

Aunque con el mecanismo anterior podríamos desarrollar un propulsor basándonos en las aletas horizontales, que aparentemente es el mejor sistema para una propulsión de tipo superficial, esto nos llevaría mucho tiempo de desarrollo y perfeccionamiento.

En el taller de la ETSEIB disponemos de un mecanismo limpiaparabrisas de la marca Volkswagen.

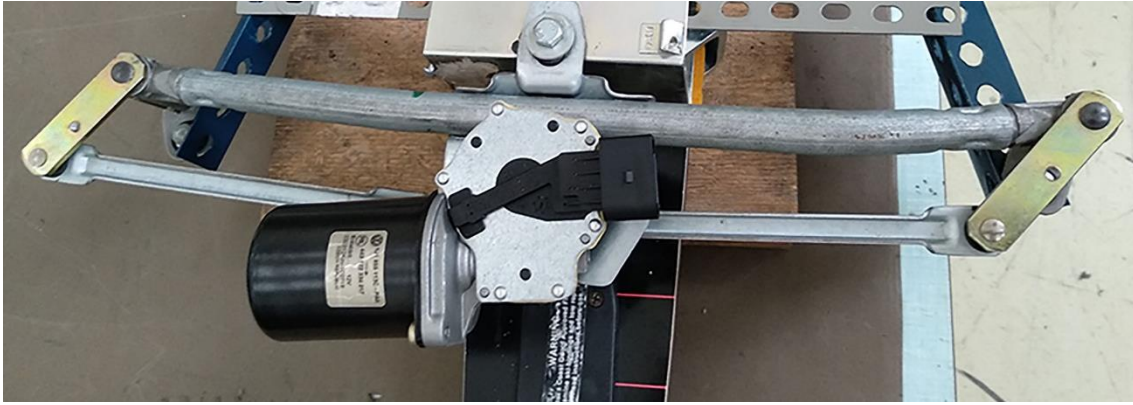


Ilustración 14: Mecanismo utilizado.

Aunque con este sistema no podremos disponer de una aleta en un plano horizontal, si no en otro vertical. Aunque, partimos con la ventaja que el mecanismo ya está construido y únicamente tendremos que integrarlo al patín con sus reservas de flotabilidad correspondientes.

4.1. Plataforma.

Para la prueba del propulsor, necesitaremos una base más o menos estable y con un cierto grado de flotabilidad, para ello cogeremos un esquí acuático disponible en el laboratorio de la ETSEIB donde le incorporaremos la base del propulsor en su parte superior.

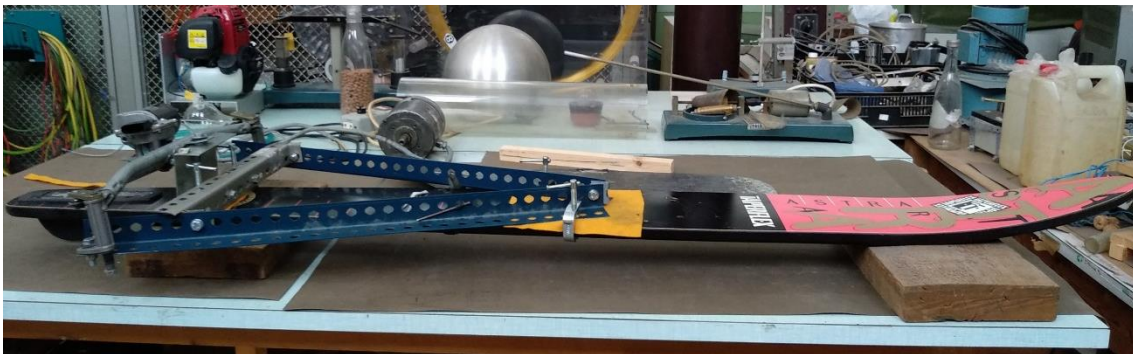


Ilustración 15: Esquí con el soporte incorporado.

Este, es un esquí acuático marca 'Taperflex' modelo 'Astra CT2000' fabricado por Wellington Leisure Products con las siguientes medidas:

- 170 x 8.5 x 2 cm.

4.2. Posición del propulsor.

Con las fijaciones por defecto que tenemos en el esquí, inicialmente, podemos definir una serie de posibles posiciones para el propulsor:

- Centro.
- Centro – proa.
- Centro – popa.

4.2.1. Prueba de estabilidad.

Para determinar las condiciones de estabilidad y flotabilidad del esquí, definimos una simple prueba cargando a este con distintos pesos en distintas posiciones y valorar la resistencia al avance de este.

4.2.1.1. *Objetivo.*

Determinar la posición más adecuada para la colocación del propulsor en el esquí. Calculamos que el peso aproximado de la unidad propulsora oscilará entre 1 y 2kg.

4.2.1.2. *Entorno y condiciones.*

Aprovecharemos las fuentes que se encuentran delante del parque de Pedralbes, delante de la facultad de física y química de la UB, como canal de pruebas.

Las condiciones para ese día proporcionaban un ambiente soleado con mucha visibilidad, pero con algunas rachas de viento, considerando a estas despreciables para el desarrollo de la prueba.

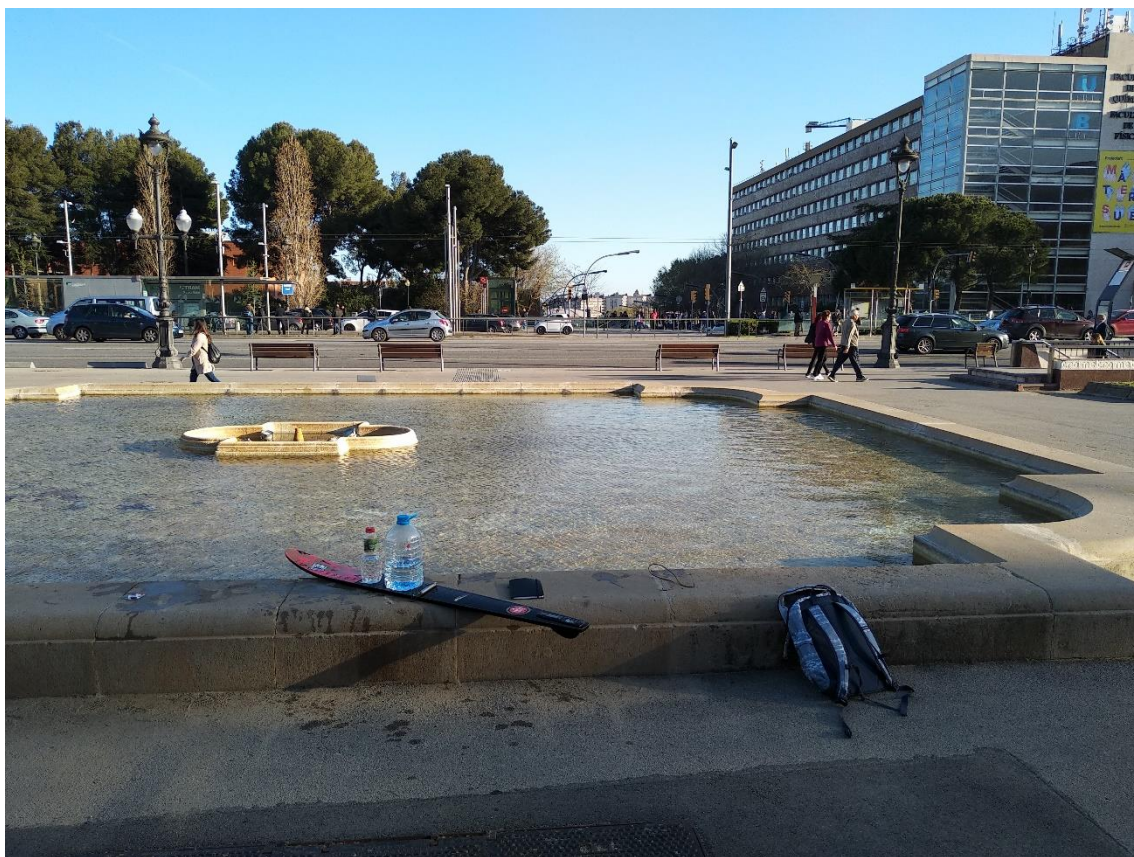


Ilustración 16: Escenario prueba de flotabilidad.

4.2.1.3. *Equipo necesario.*

Para medir la resistencia al avance del esquí en determinadas condiciones necesitaremos el siguiente equipo:



Ilustración 17: Equipo para la prueba de flotabilidad.

1. Esquí a probar.
2. Garrafa de agua para simular el peso y botella de 1l para medir los pesos.
3. Dinamómetro para medir la resistencia al avance.
4. Libreta para anotar los resultados.
5. Cabo para arrastrar el esquí.

4.2.1.4. Estabilidad inicial.

Antes de cargar el esquí observaremos las condiciones iniciales de estabilidad.

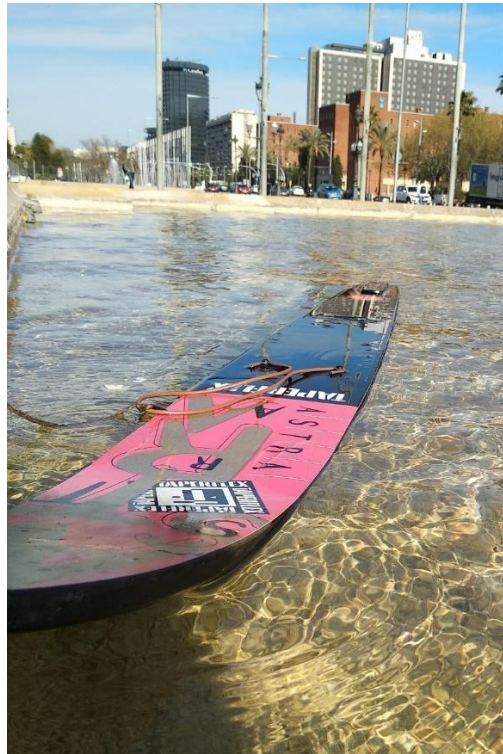


Ilustración 18: Flotación inicial del esquí.

Como podemos observar el francobordo inicial de la plataforma es muy reducido, ya que este es un patín diseñado para navegar en condiciones de planeo no de desplazamiento, de manera que intuimos que el peso a cargar manteniendo la estabilidad no será muy elevado.

La fuerza necesaria para arrastrar el esquí en vacío es inferior a 10gr.

4.2.1.5. *Carga en las fijaciones.*

Inicialmente queremos ver como se comportará el esquí con los pesos en la zona de la fijación que viene por defecto, es decir, donde se colocan los pies del deportista. Al ser esta una zona bastante amplia, podemos definir tres sub-posiciones en esta zona tal y como ya hemos comentado anteriormente.

Para determinar cuál es la posición que ofrece más resistencia al avance cargaremos 1, 2 y 3 Kg en cada una de las posiciones y arrastraremos el esquí con el dinamómetro para aproximar la resistencia al avance en cada una de ellas.

- 1Kg Centro – proa:



Ilustración 19: 1Kg Centro – proa

Estudio experimental con un mecanismo de propulsión biomimética de aletas verticales.

Como podemos observar gran parte del esquí salvo los dos extremos se encuentra sumergida parcialmente en el agua.

La fuerza necesaria para arrastrar el esquí es de +-10gr.

- 1Kg Centro:



Ilustración 20:1Kg Centro

En esta posición el patín se encuentra un poco más apoyado, continuando la parte central sumergida en el agua. Mientras que la popa aún sigue a flote.

La fuerza necesaria para arrastrar el patín es ligeramente inferior a 10 gr.

- 1Kg Centro – Popa.



Ilustración 21:1Kg Centro – Popa

La popa se encuentra completamente sumergida en el agua mientras que sobresale un poco más la proa, quedando una gran parte del patín sumergida en el agua. La fuerza necesaria es mayor a 10gr.

- 2Kg Centro – proa.



Ilustración 22:2Kg Centro – proa

Con un lastre de 2 kg la plataforma es completamente insetable, de manera que decidimos prescindir de medir la fuerza necesaria para arrastrarla, ya que por el momento en estas condiciones, no podríamos arrastrar la embarcación porque habría volcado antes.

Estudio experimental con un mecanismo de propulsión biomimética de aletas verticales.

Con este lastre únicamente permanecen a flote las partes mas extremas de la proa y popa.

- 2 Kg Centro.



Ilustración 23:2 Kg Centro.

Únicamente permanece a flote la parte mas extrema de la proa, mientras que el resto del patín se encuentra sumergido. Cabe destacar la gran inestabilidad del patín con este lastre.

- 2 Kg Centro – popa.



Il·lustració 24:2 Kg Centro – popa

El extremo de la proa emerge un poco más que en la condición anterior, aunque la popa se sumerge aún más. Hay que destacar que el patín es un poco más estable que con los 2kg situados tanto en el centro como en centro – proa.

- 3Kg Centro – proa, centro, centro – popa.



Ilustración 25: Estabilidad del patín con 3Kg.

Con este lastre el patín se encuentra completamente sumergido, en la posición centro – proa, parcialmente sumergido con el peso en el centro, y tocando con la popa en el suelo de la fuente cuando lo colocamos en la posición centro – popa.

El esqui es incapaz de cargar dicho lastre sin ninguna reserva de flotabilidad extra.

4.2.1.6. Carga en los extremos.

Al observar que el patín era más estable cuando le cargábamos el peso más en la popa, decidimos observar el comportamiento del patín con el peso situado completamente en la proa y completamente en la popa.

- Proa.



Ilustración 26: Estabilidad patín con el peso a proa.

Al tener la proa elevada, esta no logra sumergirse por completo pudiendo aguantar el lastre de 1 Kg con relativa facilidad.

Al estar más hundida la parte de la proa, que es más ancha, la fuerza necesaria para arrastrar el patín es mayor que cuando cargábamos en las posiciones centrales; $\pm 20\text{gr}$.

- Popa.



Ilustración 27: Estabilidad del patín con el lastre lo más apopado posible.

Gran parte del patín se encuentra a flote, salvo la zona de la popa. Colocando el lastre en esta posición aumentamos notablemente la estabilidad mientras que la fuerza necesaria para arrastrar el patín es de $\pm 10\text{gr}$; es decir, prácticamente igual que con el lastre situado en la zona central e inferior que con el lastre a proa.

4.2.1.7. Conclusiones.

Con las observaciones anteriores podremos concluir en la siguiente tabla, donde describimos la estabilidad del patín y la fuerza necesaria para arrastrarlo para cada posición del lastre.

Posición del lastre	Estabilidad	Fuerza
Completamente a proa	Bastante estable	$\pm 20\text{gr}$
Centro (fijaciones)	Ligeramente estable	$\pm 10\text{gr}$
Completamente a popa	Muy estable	$\pm 10\text{gr}$

Tabla 2: Estabilidad del patín y fricción en función de la posición del lastre.

De este modo podremos sacar las conclusiones finales del experimento:

1. Posicionando el propulsor a popa ganaremos estabilidad sin comprometer la fricción.
2. Debemos dotar de reservas de flotabilidad al patín para instalar el propulsor.

5. Dimensionamiento.

5.1. Reservas de flotabilidad (I).

Antes de realizar las primeras pruebas, debemos dotar a la maqueta de unas reservas de flotabilidad para que esta no se hunda, ya que como comprobamos anteriormente, el patín sin ninguna ayuda extra es capaz de soportar a flote de una manera estable un peso de entre 2 y 3 kg.

Como ya hemos determinado en el apartado 3.2. Plataforma, el esquí tiene un peso aproximado de unos 4Kg, mientras que calculamos que el peso total de la maqueta rondará sobre unos 12Kg. Esto supone que el patín tiene que lidiar con un lastre de 8Kg, ya sabemos que el patín es capaz de lastrar unos 2 Kg de peso de una manera estable, por lo tanto, nuestras reservas deberán ser capaces de cargar, como mínimo con la diferencia de 6Kg.

$$Rf = 6 * 9,81$$

$$Rf = 58,86N$$

Mediante este sencillo calculo determinamos la fuerza ascendente que nos deberá aportar dicha reserva de flotabilidad.

5.1.1. Geometría.

Una vez ya somos conscientes de la flotabilidad que nos tienen que aportar estas reservas, deberemos determinar la forma y posición de estas, ya que no tienen que suponer un gran lastre para el conjunto y a su vez tienen que mantener a flote la maqueta de una manera estable. Para ello decidimos usar bolas de poliestireno expandido, ya que nos permiten un cálculo de su flotabilidad relativamente fácil al igual que su colocación. Además, al colocar una bola a cada lado de la maqueta nos aseguraremos de mantener unas mínimas condiciones de estabilidad.

5.1.2. Cálculos.

La reserva de flotabilidad calculada anteriormente deberá repartirse entre dos bolas, de manera que cada bola nos aportará la mitad de esta:

$$Rf_{unitario} = \frac{58,86}{2}$$

$$Rf_{unitario} = 29.43N$$

Definimos $Rf_{unitario}$ como a la reserva de flotabilidad que nos tiene que proporcionar cada bola por separado.

La fuerza de flotabilidad ejercida por una esfera nos vendrá determinada por la siguiente ecuación:

$$Fb = V * d * g$$

- V =Volumen de la esfera ($\frac{4}{3}\pi * r^3$).

- d =Densidad del agua (supondremos 1000Kg/m³).
- g =Gravedad (9,81m/s²).

La fuerza de flotabilidad de cada esfera deberá ser igual a $Rf_{unitario}$, pudiendo determinar el radio de las esferas de la siguiente forma:

$$Rf_{unitario} = \frac{4}{3} * \pi * r^3 * d * g$$

$$29.43 = \frac{4}{3} * \pi * r^3 * 1000 * 9.81$$

$$r = 0.0895m$$

5.1.3. Elección

Una vez calculado el radio aproximado que deberán tener las esferas, unos 9cm, y viendo la oferta que tenemos disponible de bolas de poliestireno expandido, decidimos decantarnos por comprar dos bolas con un radio de 15cm cada una, ya que para las primeras pruebas creemos que será conveniente una reserva mayor a la calculada.

5.2. Reservas de flotabilidad (II)

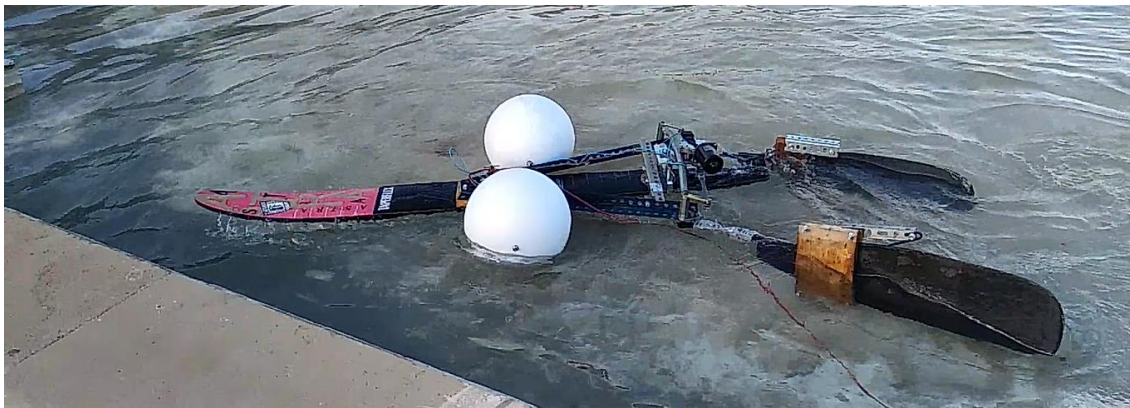


Ilustración 28: Sobredimensionamiento de las reservas esféricas.

Tal y como hemos podido observar en el ensayo 1, y como veníamos prediciendo, las dos esferas de un radio de 15cm son unas reservas sobredimensionadas.

Haciendo referencia al apartado 6.1.6.2. Reservas de flotabilidad y dinámica de la maqueta, señalamos otra vez los dos puntos clave que deberán cubrir las nuevas reservas de flotabilidad:

- Mantener a flote la maqueta, esta vez intentando ajustar las reservas de tal manera que todas ellas trabajen de una manera activa.
- Reducir el cabeceo de la maqueta.

A través de una serie de cálculos preliminares, hemos decidido construir una reserva de flotabilidad con la siguiente geometría:

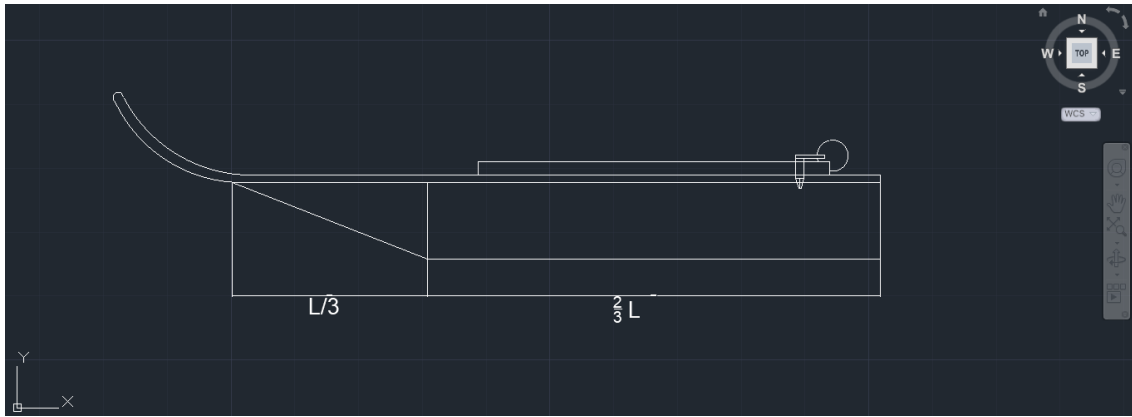


Ilustración 29: Geometría de la nueva reserva de flotabilidad.

Donde L representa la longitud total del triángulo más el rectángulo; 170cm.

5.2.1. Flotabilidad (I).

Observando la primera prueba podemos observar que menos de la mitad de las esferas trabajan de una manera activa. De aquí podemos deducir la fuerza de flotabilidad requerida por la maqueta, ya que esta sería la equivalente a la de una sola esfera, así como el volumen de poliestireno expandido requerido:

$$Fb_{\text{útil}} = \frac{4}{3} * \pi * r_{\text{útil}}^3 * d * g$$

$$Fb_{\text{útil}} = \frac{4}{3} * \pi * 0.15^3 * 1000 * 9.81$$

$$Fb_{\text{útil}} = 138.686N$$

$$V_{\text{útil}} = \frac{4}{3} * \pi * 0.15^3$$

$$V_{\text{útil}} = 0.014m^3$$

Estos cálculos suponen que la mitad de las esferas están a flote, cosa que no es exacta, ya que como hemos observado menos de la mitad de las esferas trabajan como parte activa.

Sabiendo las medidas de las dos figuras geométricas que compondrán la reserva de flotabilidad, podemos hacer un cálculo aproximado del volumen sumergido de poliestireno expandido y compararlo con el volumen útil previamente calculado:

$$V_{\text{Total}} = V_{\text{Triángulo}} + V_{\text{Rectángulo}}$$

$$V_{\text{Triángulo}} = \frac{b * h * a}{2}$$

$$V_{\text{Rectángulo}} = b * h * a$$

Donde:

- b = Base de la figura ($\frac{l}{3}$ en el caso del triángulo y $\frac{2}{3}l$ en el caso del rectángulo).
- h = Altura (calado), en este caso nos viene limitado por la profundidad de la fuente donde probamos la embarcación; esta no puede ser superior a 17cm.

- a = Ancho de la figura. La lámina de poliestireno expandido del taller tiene una anchura de unos 5cm.

Realizando los cálculos correspondientes obtenemos los siguientes resultados:

$$V_{Triángulo} = 2422.5cm^3$$

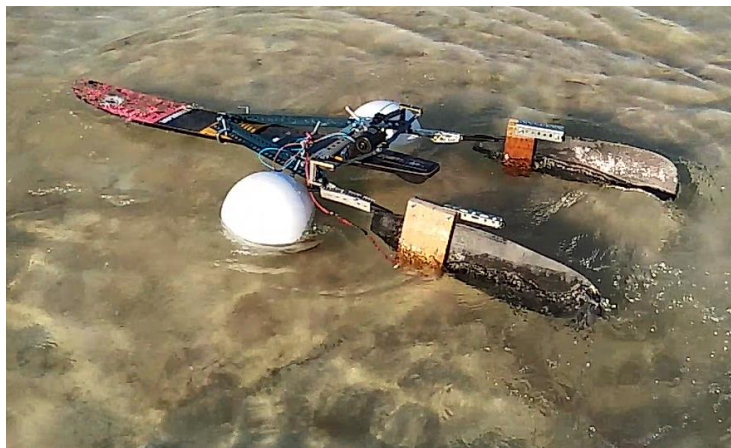
$$V_{Rectángulo} = 8500cm^3$$

$$V_{Total} = 10922.5cm^3 \approx 0.011m^3$$

Deducimos que el volumen total de poliestireno expandido en las nuevas reservas de flotabilidad será inferior al volumen útil aproximado de las esferas. La reducción del volumen sumergido no parece lo suficientemente significativa como para tener que aumentar las medidas de la nueva reserva, además, hay que tener en cuenta que para la nueva prueba habremos reducido 2kg gracias a las nuevas fijaciones para las aletas.

5.2.2. Geometría.

Para compensar el momento generado por la componente transversal de las palas, aproximadamente, el área de la orza requerida deberá ser la misma que el área equivalente de las dos palas.



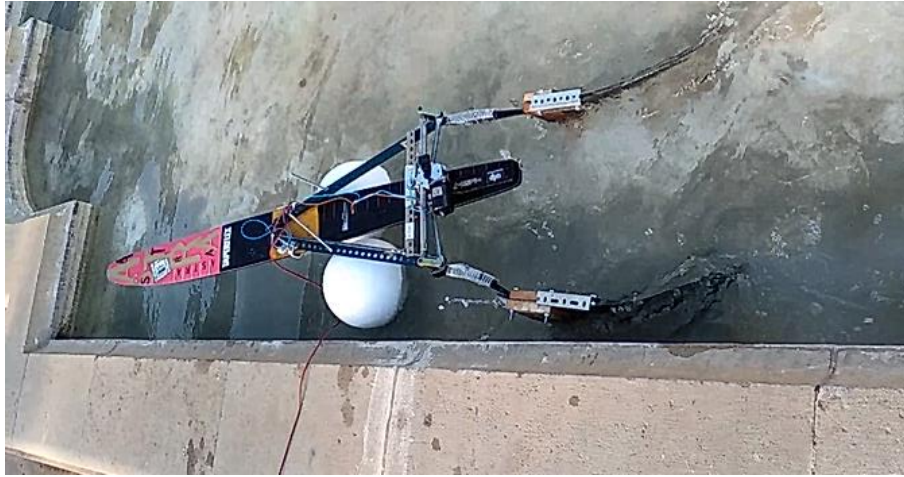


Ilustración 30: Comparación de la estabilidad con la posición relativa de las reservas de flotabilidad.

En estas imágenes podemos comprobar que la estabilidad del esquí variara en función de la posición relativa entre el centro de carena y el centro de gravedad.

Si el centro de carena se encuentra más a popa que el centro de gravedad, la maqueta tenderá a aproarse y viceversa.

Las reservas de flotabilidad nuevas deben estar completamente sumergidas y trabajando a modo de orza, de manera que deberemos calcular el centro de carena aproximado del conjunto y compararlo con la posición del centro de gravedad para verificar que estos se encuentran lo suficientemente juntos como para que la maqueta no se encuentre excesivamente aproada ni apopada.

5.2.2.1. Centro de carena.

Las posiciones relativas del centro de carena con el centro de gravedad, cogiendo las medidas previamente especificadas en los cálculos de volumen, se aproximarán a la siguiente figura:

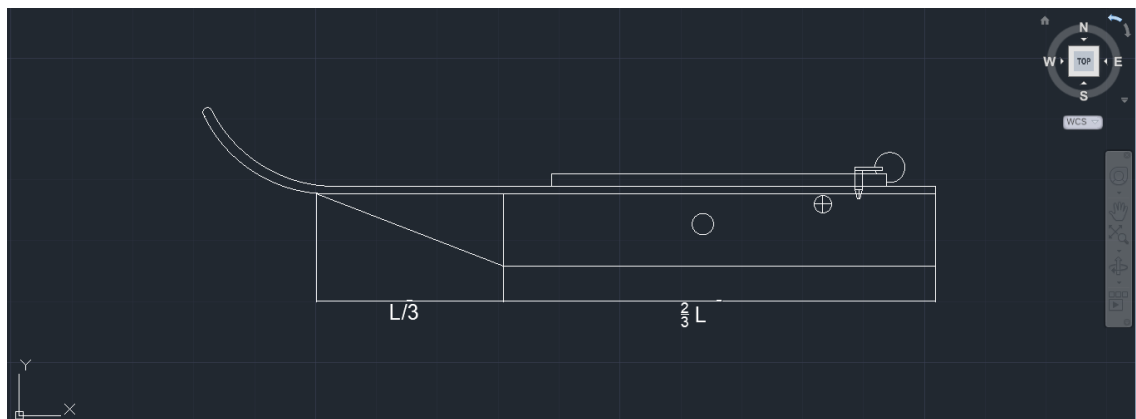


Ilustración 31: Determinación del centro de carena teórico.

Donde el centro de carena viene representado por el círculo vacío mientras que el centro de gravedad por el círculo con una cruz en medio.

Para calcular la posición aproximada del centro de carena, únicamente hemos calculado la posición en el eje x del centro de gravedad correspondiente a la figura formada por el

triángulo y el rectángulo. Mientras que la posición del centro de gravedad de la maqueta la hemos hallado de una manera experimental.

5.3. Reserva de flotabilidad pasiva.

Al substituir las bolas (sobredimensionadas) por una orza mucho más ajustada e inestable, decidimos aprovechar el hueco triangular situado en la estructura de soporte, para añadir una reserva de flotabilidad pasiva. Esta tendrá únicamente la función de, en el caso que la orza no sea suficiente o, el brazo apopante producido por la posición relativa del centro de carena con el centro de gravedad sea demasiado grande, produciendo un apopamiento excesivo, salvar el motor de entrar en contacto con el agua y poder realizar la prueba de todas maneras.

5.4. Reservas de flotabilidad (III).

Las nuevas reservas de flotabilidad deberán solucionar los problemas:

- Escora estática debida a que la distribución de pesos en la maqueta no es perfecta.
- Escora dinámica debida al ángulo de la pala de babor.
- Ángulo de cabeceo de la maqueta.

En el taller disponemos de trozos de poliestireno expandido con forma de "c". Decidimos sujetar un trozo a cada banda a modo de patín, convirtiendo la maqueta en un trimarán. Esta disposición nos permitirá: fuerza resistente al avance

- Reducir la escora tanto estática como dinámica; al apoyarse en dos patines, aumentamos considerablemente la manga de la maqueta y con ello su estabilidad.

Estas nuevas reservas presentan dos lados donde, al rotar la embarcación hacia babor o estribor generan una fuerza resistente al avance hacia un lado u otro dependiendo del sentido de M_t (Fr_{Br} y Fr_{Er}).

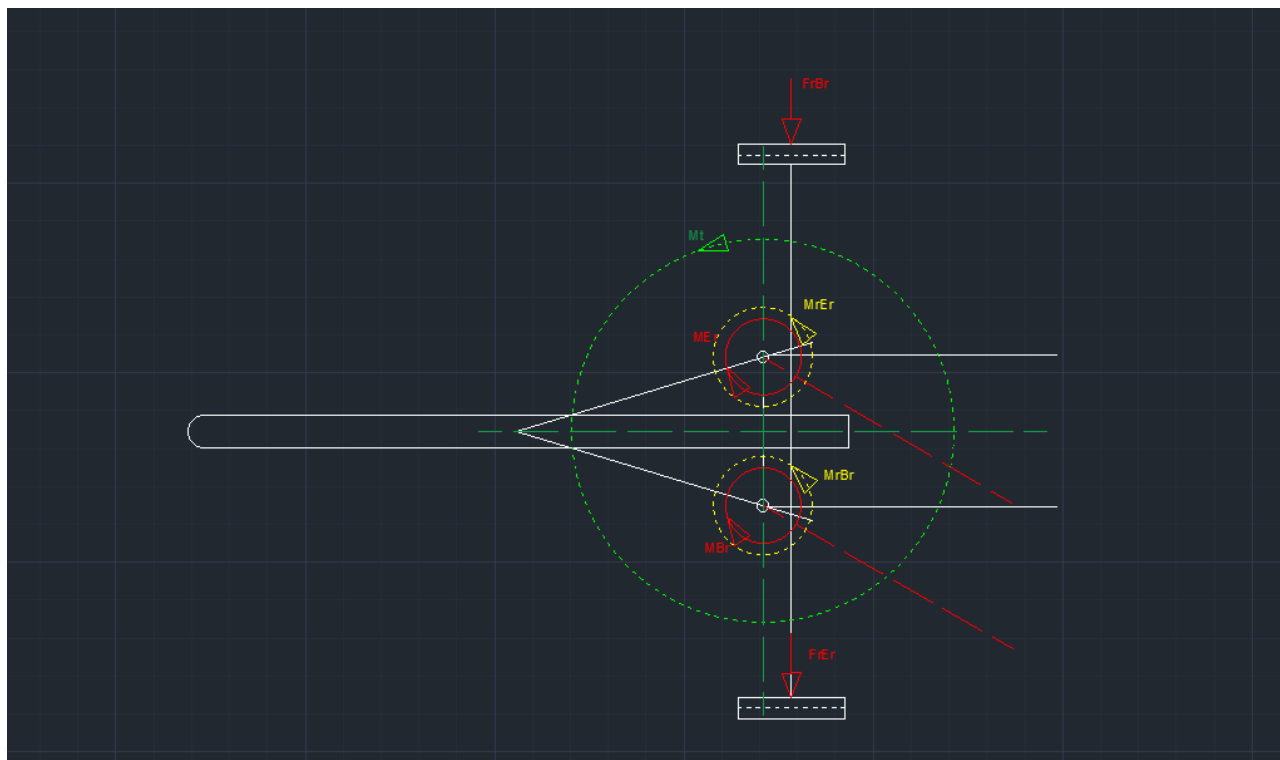


Ilustración 32: Representación de fuerzas y momentos. Fuente propia.

Notar que, en el caso del dibujo anterior, se dará que $FrBr > FrEr$ debido a la forma de la pieza, ya que la cara de ataque en la reserva de babor será la cara "a" y en la reserva de estribor, la cara de ataque será la cara "b".

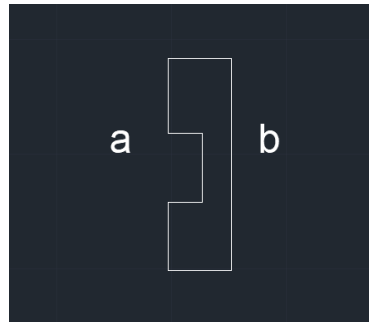


Ilustración 33: Sección de los trozos de poliestireno expandido utilizados.

Esto se debe a que el coeficiente de arrastre para una sección como la cara "a" es mayor al de otro como la cara "b".

Las dos fuerzas resistentes al avance darán lugar a un momento contrario a Mt ; el momento resistente (Mr) responsable de reducir la rotación (o cabeceo) del patín.

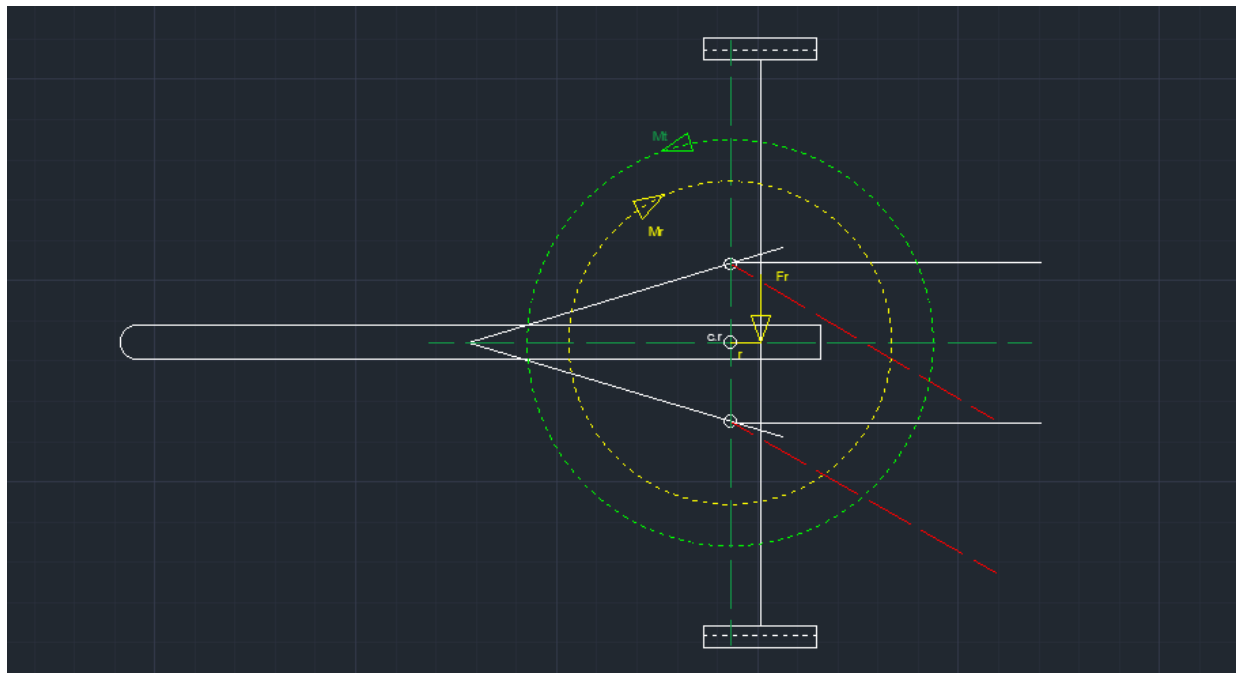


Ilustración 34: Momentos resultantes en la maqueta. Fuente propia.

- $Mr = Fr * r$
- $Fr = FrBr + FrEr$
- $Mt = MrBr + MrEr$ (En Ilustración 32: Representación de fuerzas y momentos. Fuente propia.)

Notar que cuanto más a popa situemos las reservas de flotabilidad, al aumentar la distancia (r) entre Fr y el centro de rotación de la maqueta ($c.r$), mayor será Mr .

6. Construcción.

6.1. Estructura.

Con anterioridad a la construcción de las reservas de flotabilidad y el dimensionamiento del propulsor, hemos construido una estructura para contener todos los componentes añadidos al esquí. Esta estructura es un triángulo construido mediante barras de acero encontradas en el taller de la ETSEIB, a la cual se va a sujetar el mecanismo de propulsión.

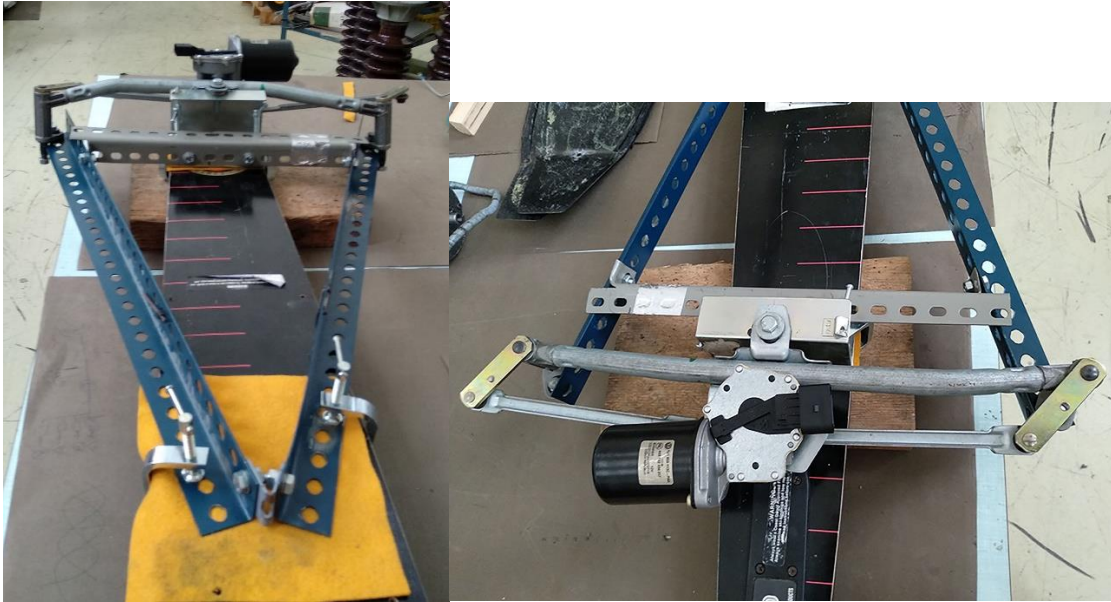


Ilustración 35: Sujeción de la estructura.

6.2. Aletas(l).

Para la unión de las aletas con el mecanismo propulsor, tenemos los brazos de los limpia parabrisas originales a los que les tendremos que adaptar las aletas de fibra de carbono. Para ello decidimos tomar una decisión bastante austera y realizar la unión mediante dos bloques de madera a modo de pinza.



Ilustración 36: Solución para sujetar las aletas.

En la fotografía también podemos observar que aparte de los bloques, hemos colocado una barra que conecta los bloques de madera con los brazos de los limpias, este refuerzo nos elimina la oscilación que la pala, junto con las maderas, pueda tener alrededor de los brazos.

6.3. Aletas (II).

La construcción para la sujeción de las aletas, aunque útil, no era una solución del todo acertada, ya que presentaba dos problemas:

- Brazos poco rígidos.
- Conjunto muy pesado.

Para solucionar estas dos taras, con la ayuda del profesor, hemos adaptado dos brazos de aluminio a modo de pinza para unir las palas con el mecanismo de propulsión, pudiendo descartar completamente los brazos que teníamos en un origen. Al ser una estructura sólida nos aporta rigidez a la hora de transmitir los esfuerzos a las palas, y al estar hechos de aluminio reducimos el peso significativamente.



Ilustración 37: Sujeción de las palas de aluminio.

En la zona donde los brazos cogen las palas, hemos dispuesto unos trozos de cámara de camión a modo de junta entre estos para repartir los esfuerzos en la pala y mejorar la unión.



Ilustración 38: Comparación de los distintos modos de sujeción.

El peso del conjunto de brazos antiguo pesaba 1,7kg cada uno, mientras que el nuevo ronda los 0.8Kg. Esto supone una reducción de casi 2Kg en total para la maqueta.

6.4. Aletas (III).

Los brazos de aluminio tras el transcurso de la segunda prueba, se partieron por la siguiente zona:



Ilustración 39: Punto de rotura.

Esto nos permitirá modificar los puntos de sujeción de las palas, realizando un segundo agujero en la zona de sujeción, de esta manera podremos probar en cuál de estos puntos el conjunto es más eficaz



Ilustración 40: Nuevos puntos de sujeción de las aletas.

En el siguiente ensayo, al tener dos modos diferentes de sujeción definiremos lo siguiente:

- Aletas avanzadas cuando estén sujetas en el agujero 1.
- Aletas atrasadas cuando se sujeten en el agujero 2.

6.5. Reservas de flotabilidad (I).

Las esferas como reserva de flotabilidad, al no ser un elemento definitivo de la maqueta, deben de poder quitarse y ponerse de manera relativamente fácil y su posición con respecto al prototipo debe de poder coger varios puntos. Por ello, optamos en sujetar las esferas en la estructura central con unas varillas de 8mm. Estas varillas irán sujetas a ambos lados de la

estructura por medio de tuercas, del mismo modo que la sujeción entre la varilla y la esfera. A modo de impermeabilizar los agujeros en las esferas rellenaremos los agujeros de estas con cola termofusible.

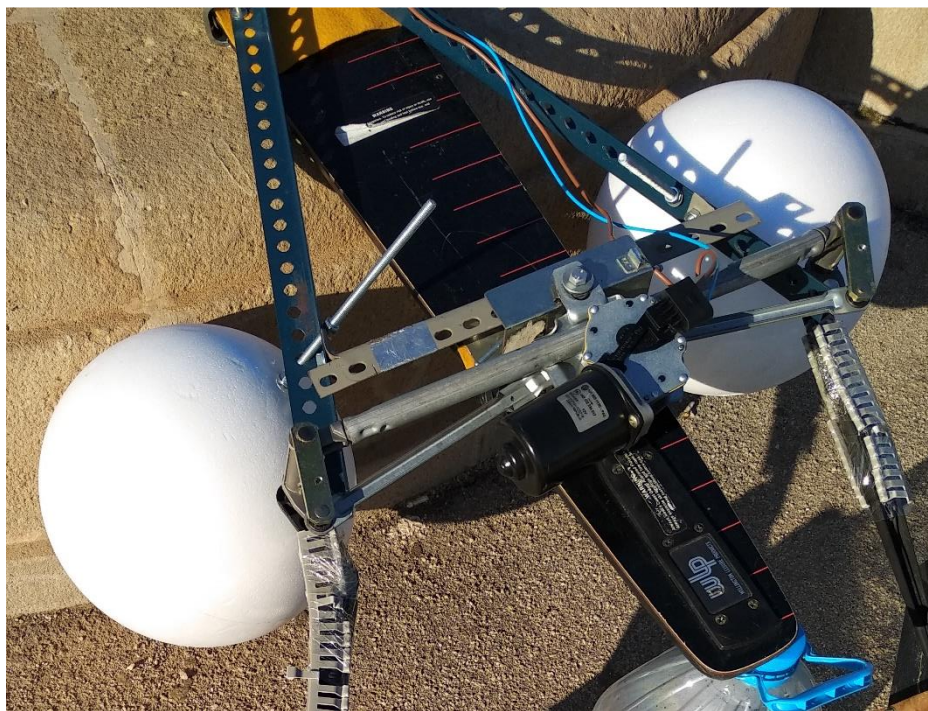


Ilustración 41: Reservas de flotabilidad esféricas y su colocación.

6.6. Reservas de flotabilidad (II).

Para la construcción de la orza procederemos a cortar dos trozos de poliestireno expandido; uno a modo de triángulo y otro a modo de rectángulo con las medidas previamente mencionadas.



Ilustración 42: Construcción de la orza.

Una vez cortados estos trozos procederemos a pegarlos con cola para poliestireno expandido y lo dejaremos secar.

La sujeción a la maqueta va a ser por medio de cinta perforada tal y como se observa en la imagen siguiente:



Ilustración 43: Sujeción de la orza.

6.7. Reserva de flotabilidad pasiva.

Para la reserva de flotabilidad pasiva, marcamos las medidas correspondientes, cogiendo como molde la estructura misma y luego lo cortamos con ayuda de una pequeña sierra.



Ilustración 44: Construcción de la reserva de flotabilidad pasiva.

Para sujetar el poliestireno con la estructura, pasaremos unos espárragos a proa y popa de la estructura y por dentro del poliestireno para que este no salga en el caso de sumergirse.

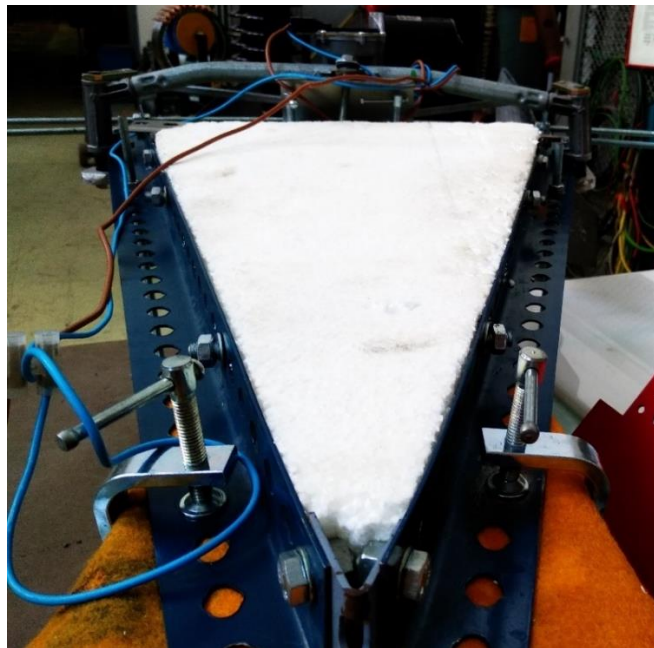


Ilustración 45: Sujeción de la reserva de flotabilidad pasiva.

6.8. Reservas de flotabilidad (III).

Las nuevas reservas de flotabilidad irán sujetas a la maqueta a través de dos espárragos roscados de métrica 8, para ello debemos definir las siguientes medidas para:

- La sujeción del espárrago con el poliestireno expandido.
- Unión del conjunto espárrago y poliestireno con la maqueta.

Para sujetar los trozos de poliestireno expandido con los espárragos adaptaremos dos láminas de aluminio a cada cara de este para poder apretar a ambas caras de la reserva sin que el poliestireno expandido se rompa o deforme. Estas láminas tendrán diferentes agujeros para que, en el momento de la prueba, si lo requiere, poder adelantar o atrasar las nuevas reservas de flotabilidad.



Ilustración 46: Unión del poliestireno expandido con las dos varillas de métrica 8.

Una vez hemos fijado el modo de unión de las reservas, pasamos a la sujeción con la maqueta, esta se realizará de la misma manera con la que hemos unido el poliestireno expandido con los espárragos. Mediante un sistema de rosca y contra rosca sujetaremos las dos varillas con la estructura central, intentando mantener siempre una simetría. Cabe destacar que las dos varillas no son enteras, sino que, debido a la longitud requerida, resultan de la unión de dos varillas de métrica 8.



Ilustración 47: Vista trasera del conjunto (Izq.) Y la unión de las varillas (Dcha.).

7. Pruebas maqueta.

7.1. Ensayo 1.

El miércoles 2 de mayo de 2018 procedemos a probar la maqueta en su forma más básica, una vez montadas los primeros diseños de aletas y flotadores.

7.1.1. Condiciones del ensayo.

El día se presenta soleado y con algunas rachas de viento, como en la prueba de flotabilidad, esta se realizará en las fuentes en frente de la ETSEIB. Esta tiene un calado aproximado de 18cm, de manera que antes de empezar la prueba ya sabemos que este nos va a limitar las condiciones de la primera prueba de natación.

7.1.2. Material utilizado.

- Rollo de cable rojo-negro.
- Batería 12v/7A
- Alicates.
- 2 garrafas 5l.
- Tijeras
- Cello.
- Prototipo.

7.1.3. Preparativos.

Antes de tirar el prototipo al agua debemos colocar el prototipo fuera del agua utilizando como caballete las garrafas de agua. Seguidamente procedemos a fijar los brazos de los limpiaparabrisas en una posición horizontal, ya que debido al peso de la unión brazo-aleta, el muelle encargado de mantenerlos en esa posición cede. A continuación, observamos el método de fijación de los brazos, así como las garrafas de agua a modo de caballete.



Ilustración 48: Apoyo de la maqueta fuera del agua.

7.1.3.1. Observaciones.

Incluso antes de botar la maqueta ya observamos dos fallos o carencias constructivas:

- 1- Los brazos propulsores no se aguantan horizontalmente debido el peso de la unión brazo-aleta.
- 2- Para tener la maqueta fuera del agua no tenemos ningún caballete o sujeción estable para poder trabajar con ella correctamente.

Para el siguiente ensayo estos dos puntos deben estar solucionados.

7.1.4. Ensayos.

Realizaremos tres ensayos variando en cada uno la posición de las reservas de flotabilidad en la maqueta. Como ya se ha comentado, al no tener el suficiente calado las palas tocan con el fondo de la fuente.

Las reservas de flotabilidad pueden colocarse de las siguientes formas:

7.1.4.1. Reservas atrasadas, por debajo de la flotación del esquí.



Ilustración 49: Condiciones estática (arriba) y dinámica (abajo) con las reservas atrasadas por debajo de la flotación del esquí

Inicialmente todo el esquí se encuentra en el aire, aunque a medida que este se va moviendo, la proa empieza a meterse dentro del agua.

7.1.4.2. *Reservas adelantadas, en la flotación del esquí.*

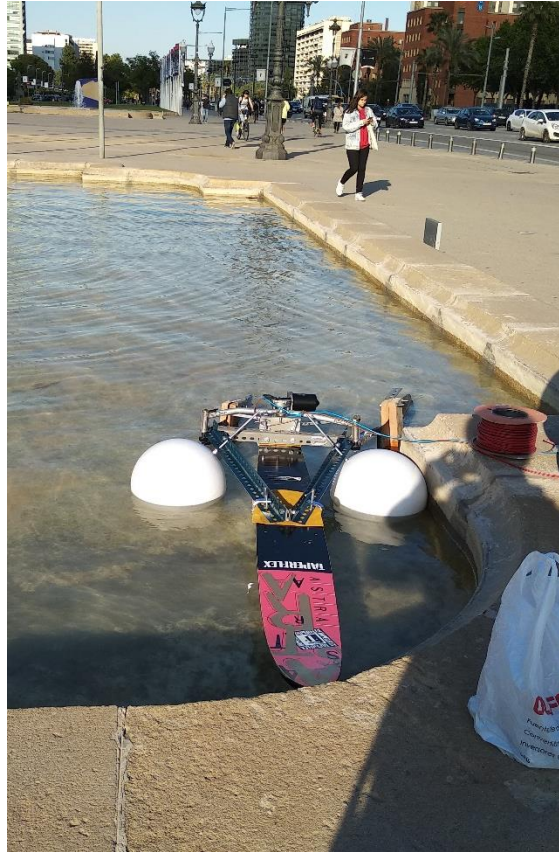


Ilustración 50: Maqueta estática con las reservas adelantadas en la flotación del esquí.

En esta posición, la flotación de la maqueta es más homogénea ya que todo el patín se encuentra en el agua en una posición bastante estable. Dinámicamente esta geometría es más estable, ya que la posición del patín no varía dependiendo de si este se encuentra en reposo o en movimiento.

7.1.4.3. *Reservas adelantadas, por debajo de la flotación del esquí.*

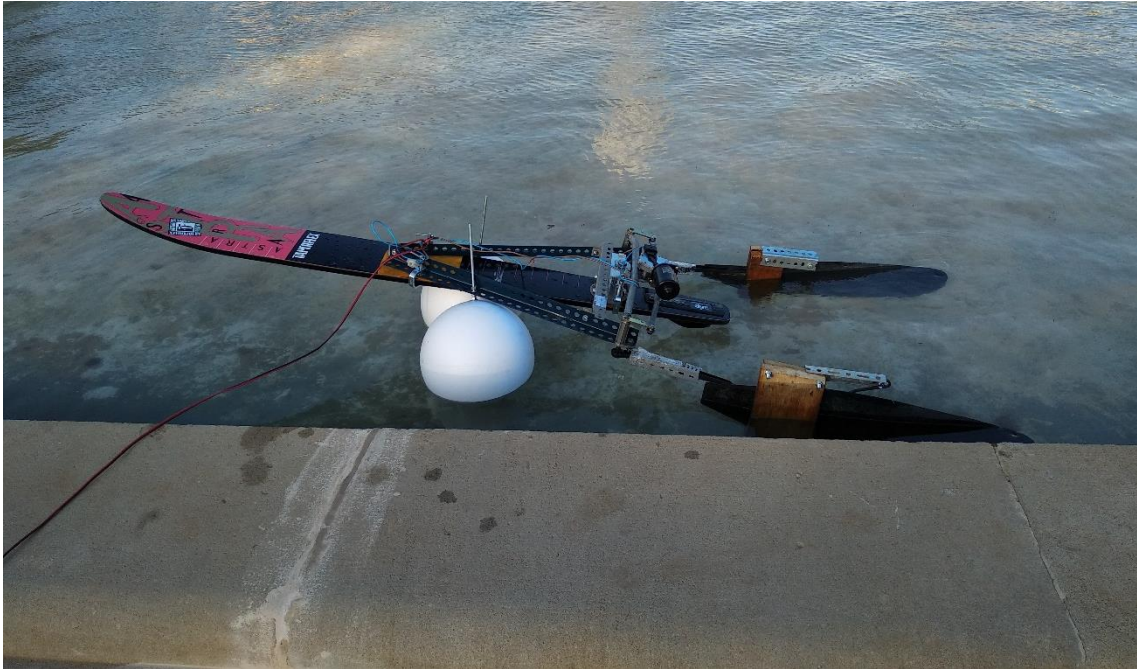


Ilustración 51: Situación estática de la maqueta con las reservas adelantadas por debajo de la flotación del esquí.

Con esta distribución, únicamente la pequeña orza situada en la popa es la que se encuentra en contacto con el agua, mientras que todo el patín se encuentra fuera. Cuando la maqueta está en movimiento, el asiento del patín tampoco varía.

7.1.5. Observaciones.

7.1.5.1. *Flotabilidad*

La primera observación que podemos hacer justo botando la maqueta, es que los cálculos hechos previamente en las reservas de flotabilidad han salido como pensábamos, ya que claramente estas están sobredimensionadas. Como hemos visto en las pruebas con las reservas por debajo de la flotación, las esferas son capaces de cargar prácticamente la totalidad del peso de la maqueta.



Il·lustració 52: Situació estàtica de la maqueta con las reservas de flotabilidad esféricas.

En la prueba donde las esferas se encontraban en la línea de flotación del patín, hemos podido observar que la flotación general de la maqueta era estable y uniforme, ya que todo el patín se encontraba en el agua flotando por sí mismo con un calado más o menos apropiado.

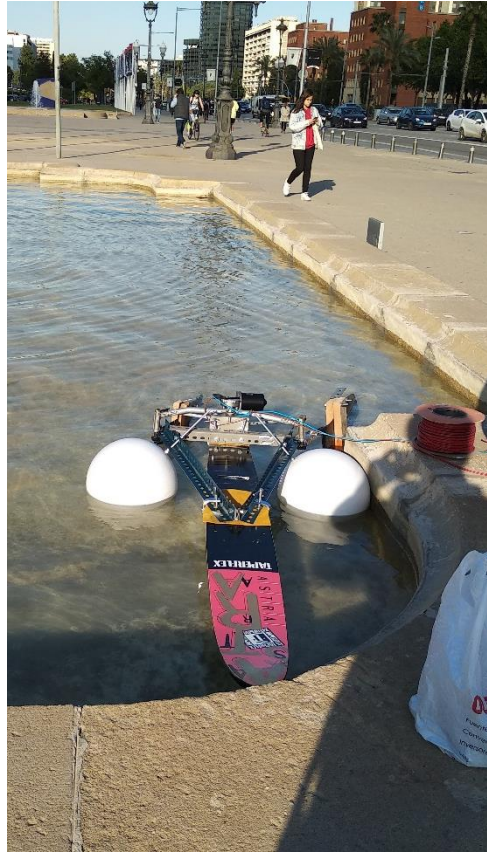


Ilustración 53: Comportamiento estático (arriba) y dinámico (abajo) con las reservas de flotabilidad debajo del centro de gravedad.

Observamos que las esferas se encuentran sumergidas prácticamente hasta su centro, de esta manera podemos deducir que únicamente necesitaremos la mitad de la reserva de flotabilidad previamente calculada, si queremos construir unos flotadores que sobresalgan menos.

7.1.5.2. Dinámica (Cabeceo).

En todas las posiciones en las que se han colocado las reservas de flotabilidad, hemos observado que, debido a las componentes de la fuerza resultante de las palas, el patín oscila en torno a un centro de rotación, entorno a unos 15 – 20 grados, hacia babor y estribor.

Este movimiento resulta de la suma de momentos M_{Br} y M_{Er} .

7.1.5.2.1. Momento en el mecanismo.

Para impulsar la maqueta, el mecanismo de limpiaparabrisas debe de generar un momento para mover las palas hacia ambos lados (M_{Br} y M_{Er}).

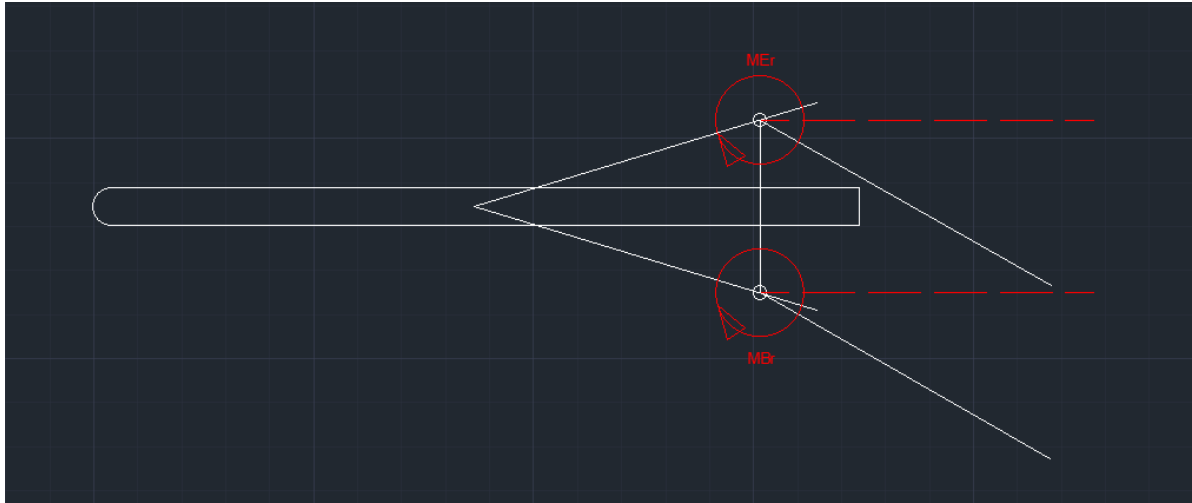


Ilustración 54: Momentos generados por el mecanismo limpia parabrisas.

7.1.5.2.2. Momentos en las palas y momento resultante total.

Al moverse las palas en el agua, estas generan una fuerza en el fluido (F) y, tal y como dice la 3ª ley de Newton, también el fluido ejerce una fuerza que se opone al movimiento de la pala (F_r).

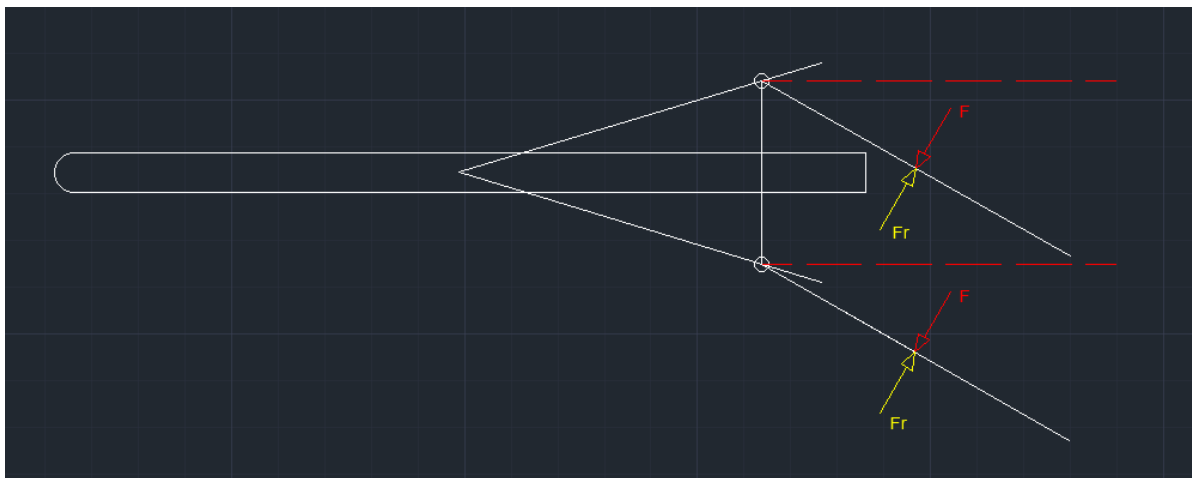


Ilustración 55: Fuerzas en las palas.

Estas fuerzas se ejercen en el centro de la pala (c.p). La fuerza opuesta al movimiento de la pala es responsable de producir el momento responsable del cabeceo (M_T) en el centro de giro de la maqueta (c.g)

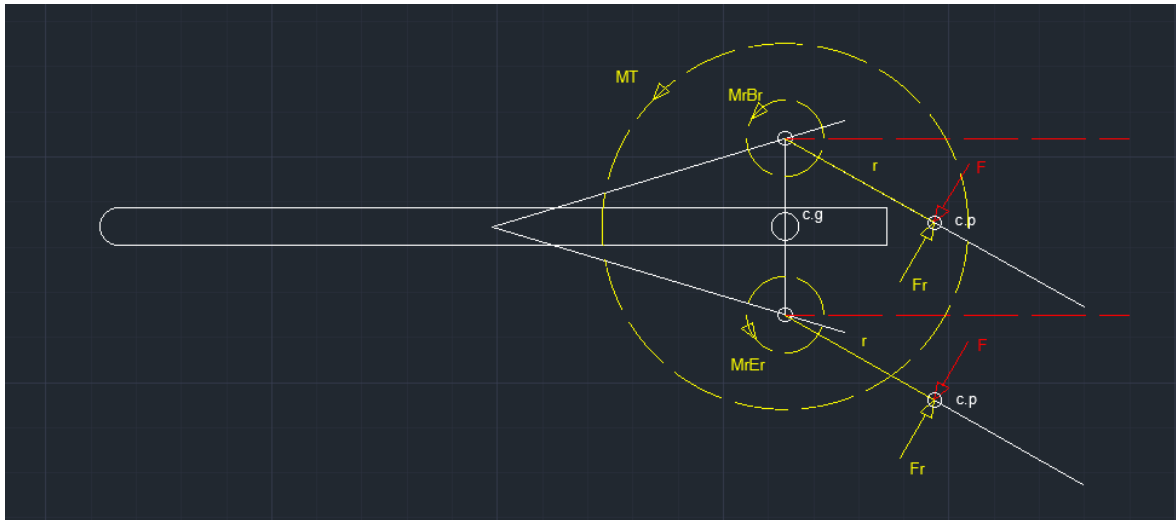


Ilustración 56: Momentos resultantes de las fuerzas en las palas.

$$Mr = Fr * r$$

$$MT = MrBr + MrEr$$

7.1.6. Puntos a mejorar.

7.1.6.1. Sujeción de la maqueta.

Como ya hemos comentado anteriormente, al estar fuera del agua, es difícil colocar la maqueta fuera del agua de una manera estable para poder realizar los preparativos previos, para ello deberemos ingeniar algún tipo de soporte para poder trabajar correctamente con el modelo fuera del agua.

7.1.6.2. Sujeción de las palas.

Los brazos del mismo limpia-parabrisas no son lo suficientemente rígidos como para aguantar por si solos el peso de las palas, además de que la sujeción de los brazos y las palas resulta muy pesada.

7.1.6.3. Reservas de flotabilidad y dinámica de la maqueta.

Al observar que las reservas previamente calculadas, aparte de ser hidrodinámicamente ineficientes, han sido sobredimensionadas y junto con la mala dinámica de la maqueta debido a su giro entorno al punto de rotación debido a las fuerzas resultantes de las aletas, se nos presentan dos puntos importantes a mejorar:

- Redimensionamiento de las reservas de flotabilidad.
- Reducción del ángulo de rotación del esquí (cabeceo).

Estos dos problemas pueden intentar solucionarse mediante la fabricación de una orza fabricada en poliestireno expandido, de tal manera que su función sea tanto de reserva de flotabilidad como la de contra-restar las componentes transversales procedentes de las palas y, por lo tanto, ayudar a aumentar la velocidad de avance de la maqueta.

7.2. Ensayo 2.

7.2.1. Condiciones del ensayo.

Las condiciones climáticas para la segunda prueba eran las óptimas, presentándose un día soleado y sin viento.

El lugar del ensayo vuelve a ser el mismo; la fuente en frente del ETSEIB cuyo calado ese día era de unos 30cm, mucho mayor de lo esperado.

7.2.2. Material utilizado.

Para esta segunda prueba el material utilizado fue el siguiente:

- Voltímetro.
- Amperímetro.
- Cable.
- Tijeras.
- Llaves planas.
- Destornillador.
- Cello.
- Trozo de poliestireno expandido.
- Cinta métrica.
- Batería.
- Prototipo.

7.2.3. Modificaciones.

El lunes 21 de mayo la maqueta presentaba las siguientes modificaciones con respecto a la prueba anterior:

- Nuevas reservas de flotabilidad activa (a modo de orza) y pasiva.
- Nuevos brazos de sujeción para las aletas más livianos y rígidos.
- Soportes para la sujeción de la maqueta fuera del agua.

7.2.4. Observaciones.

7.2.4.1. Primera puesta a flote.

En la primera sumergida la maqueta se presentó completamente inestable escorando violentamente hacia babor, revelando así una mala distribución de pesos en el prototipo.

Para solucionar este fallo procedemos a pegar con cello en la parte de babor el trozo de poliestireno expandido de respeto.

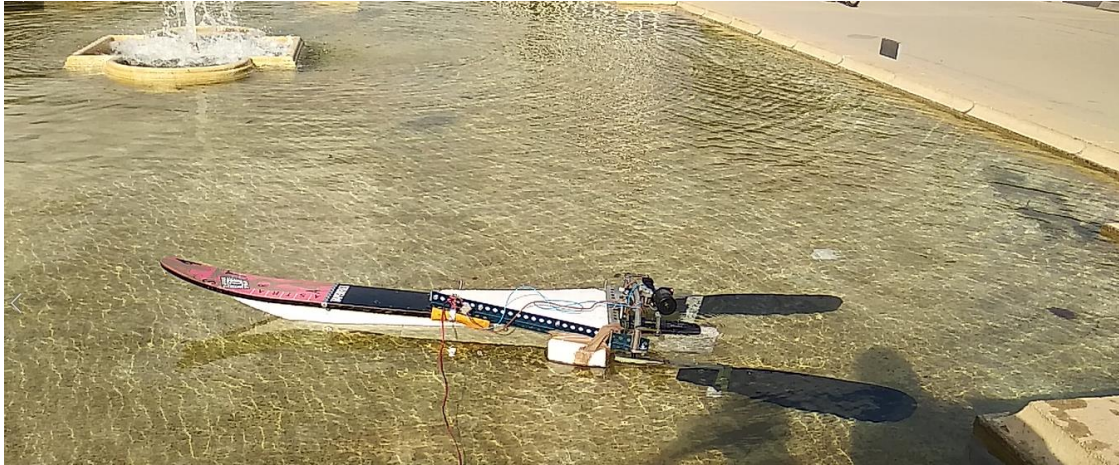


Ilustración 57: Primera puesta a flote con la orza.

7.2.4.2. Situación estática.

Como ya hemos comentado anteriormente, el calado de la fuente era de unos 30cm. En estas condiciones la orza no toca con el fondo, mientras que las aletas, en su parte más extrema se encuentran justo al límite del fondo de la fuente.

El brazo debido a que el centro de carena se encuentra adelantado al centro de gravedad es el que esperábamos, mostrándose la maqueta con un ligero asiento hacia popa y encontrándose gran parte de la proa del esquí fuera del agua.

Las estimaciones de flotabilidad para la orza también han resultado satisfactorias, ya que únicamente la orza es capaz de mantener a flote toda la maqueta, sin tener que necesitar parte de la reserva de flotabilidad pasiva.

7.2.4.3. Situación dinámica.

En su corta navegación, y consumiendo unos 6A, el prototipo presentó las siguientes dinámicas:

Cabeceo del patín.

Este era uno de los puntos más importantes a eliminar y para el que se instaló la reserva de flotabilidad a modo de orza. Como hemos podido observar, el cabeceo se ha reducido sensiblemente, aunque no lo suficiente.

Escora dinámica.

Una vez realizadas las primeras paladas, la maqueta empieza a presentar una extraña escora hacia babor acompañada con las paladas. Esto es debido a que el mecanismo propulsor, no es simétrico y en el punto de sujeción del brazo de babor presenta un ángulo ausente en la parte de estribor. Esto causa que la aleta de babor, aparte de oscilar de banda a banda, como la de estribor, también oscila de arriba abajo.



Ilustración 58: Escora hacia babor debida al ángulo de la pala.

7.2.5. Mejoras.

7.2.5.1. Mejoras alcanzadas.

Con respecto a la prueba anterior, compararemos si las modificaciones realizadas han resuelto los puntos a mejorar en el apartado 6.1.6. Estos puntos eran:

- Sujeción de la maqueta fuera del agua → ¡Conseguido! Gracias a las varillas instaladas en la estructura de sujeción, al estar la maqueta fuera del agua esta puede apoyarse sin ningún problema, además de no interferir cuando esta se encuentra navegando.
- Reservas de flotabilidad completamente sumergidas → ¡Conseguido! La nueva reserva de flotabilidad a modo de orza cumple su función a la perfección en términos de flotabilidad.
- Cabeceo del patín → No conseguido. Aunque la orza ha logrado disminuir el ángulo de oscilación del patín y este ya es ligeramente inferior al ángulo de las palas, este sigue siendo inaceptable.

7.2.5.2. Futuras mejoras.

Como puntos a mejorar tendremos los siguientes:

- Cabeceo del patín.
- Escora estática.
- Escora dinámica.

Como futura mejora para corregir estos dos puntos, propondremos como solución la instalación y modificación de los siguientes componentes:

- Nuevas reservas de flotabilidad a modo de patines laterales para aumentar tanto la estabilidad estática como la dinámica, y, además, reducir el cabeceo del patín.
- Modificación del brazo de babor para corregir el ángulo por defecto del mecanismo propulsor.

7.3. Ensayo 3.

7.3.1. Condiciones del ensayo.

Las condiciones climáticas para la segunda prueba eran las óptimas, presentándose un día soleado y sin viento.

El lugar del ensayo es otra vez la fuente en frente de la ETSEIB cuyo calado vuelve a ser de unos 30cm.

7.3.2. Material utilizado.

Para esta tercera prueba el material utilizado fue el siguiente:

- Voltímetro.
- Amperímetro.
- Cable.
- Tijeras.
- Llaves planas.
- Destornillador.
- Cello.
- Cinta métrica.
- Dinamómetro.
- Prototipo.

7.3.3. Modificaciones.

El lunes 4 de junio la maqueta presentaba las siguientes modificaciones con respecto a la prueba anterior:

- Nuevas reservas de flotabilidad laterales.
- Nuevos anclajes en los brazos de sujeción de las palas.

7.3.4. Primeras impresiones.

Antes de empezar con la toma de datos (voltaje, intensidad, tiro, etc.) procedemos a botar la maqueta y a observar sus condiciones estáticas y dinámicas.

7.3.4.1. Condición estática.

Estáticamente las nuevas reservas de flotabilidad, al convertir la maqueta en un trimarán, aportan una gran estabilidad, resolviendo el problema de la prueba anterior en cuanto a estabilidad estática.



Ilustración 59: Flotación de la maqueta en condiciones estáticas.

Destacar que la maqueta se encuentra ligeramente apopada, sin llegar sumergir la popa, y sin ninguna extraña escora hacia alguna de las bandas. En ningún momento, tanto las palas como la orza tocan el fondo de la fuente.

7.3.4.2. Condición dinámica.

Las nuevas reservas de flotabilidad han ayudado mucho a la estabilidad de la maqueta, evitando extrañas escoras cuando la maqueta se encuentra en reposo, e incluso cuando esta se encuentra en movimiento. También han ayudado a reducir el cabeceo del patín gracias al momento resultante explicado en el apartado 4.4. Reservas de flotabilidad (III). Aunque este momento resultante encargado de reducir el cabeceo del patín, no es suficiente ya que este sigue siendo excesivo. Para reducir aún más este efecto se podrían atrasar aún más las nuevas reservas.

7.3.5. Prueba con las dos palas avanzadas.

En esta prueba mediremos los consumos tanto de tensión como de corriente, la potencia de tiro y, a través del video, estimaremos su velocidad. Sacando la siguiente tabla de conclusiones:

- Mediciones tomadas con las dos palas avanzadas (agujero 1).

	Voltaje (v)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Fuerza (Kg)	Velocidad (m/s)
Min.	10.7	3.3	37.95	1.5	-
Max.	11.5	5	53.5	2.5	-
Medio.	11.1	4.15	45.73	2	-
Estimada.	-	-	-	-	0.3

Tabla 3: Mediciones con las palas avanzadas.

*Tener en cuenta que el valor máximo medido de tensión corresponde con el valor mínimo medido de corriente y viceversa.

7.3.5. Prueba con la pala de estribor.

Para las siguientes dos pruebas decidimos medir la potencia de tiro a punto fijo de la maqueta para cada una de las palas por separado cambiando los anclajes.

Estas pruebas tienen como objetivo:

- Medir las fuerzas de cada pala por separado.
- Observar los cambios al adelantar o atrasar cada pala.

Esta prueba nos proporciona la siguiente tabla de resultados:

	F. Aleta avanzada (Kg)	F. Aleta atrasada (Kg)
Mín.	1.5	1
Máy.	2	1.5
Medio.	1.75	1.25

Tabla 4: Fuerza realizada por la pala de estribor.

7.3.6. Prueba con la pala de babor.

Una vez tomados los datos en la prueba anterior, procedemos a realizar la misma prueba con la aleta de babor. Recordar que esta aleta, debido a una asimetría del mecanismo limpiaparabrisas, tiene un ligero ángulo. Esto le proporciona a la pala de babor un movimiento diferente al de la pala de estribor.

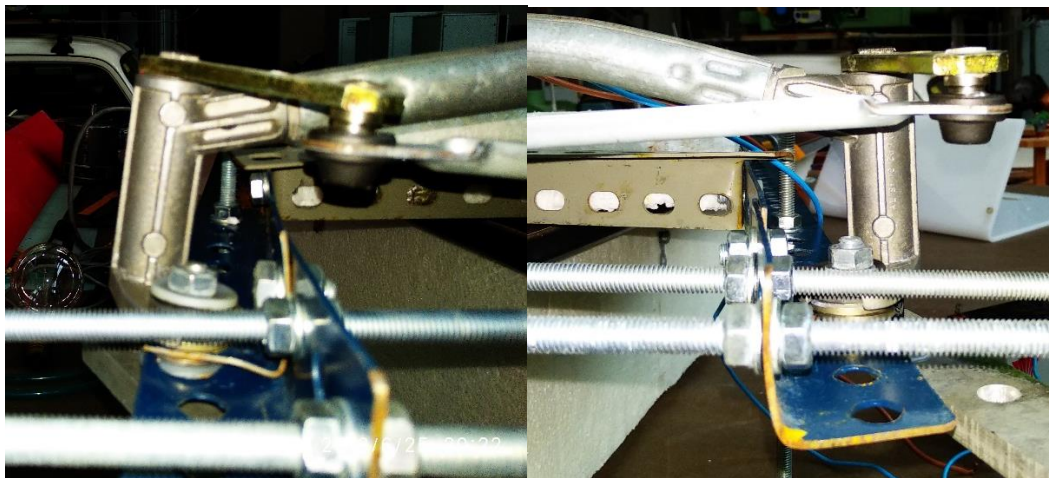


Ilustración 60: Anclaje babor (Izq.) y anclaje estribor (Dcha.).

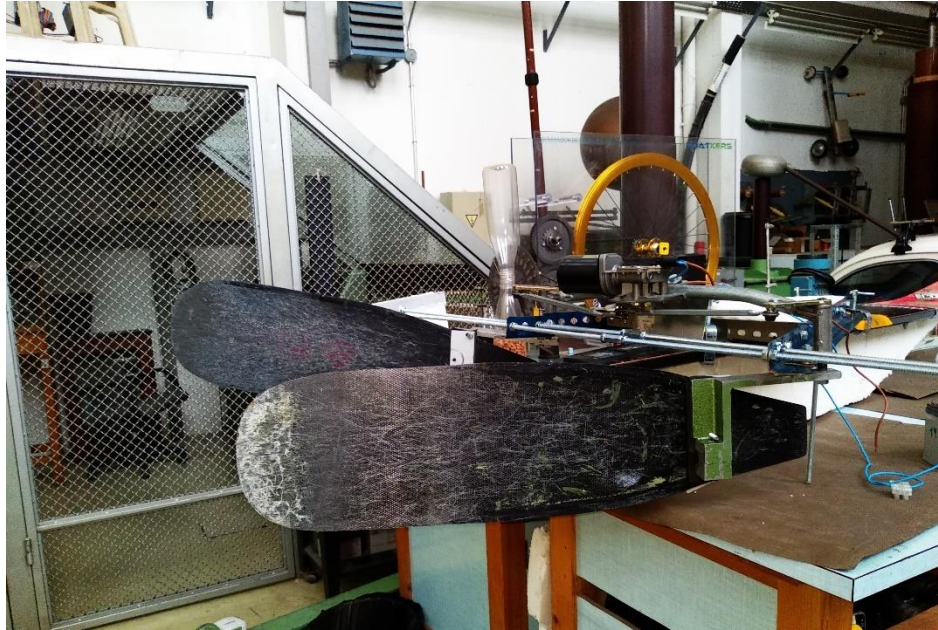


Ilustración 61: Diferencias de inclinación en las palas debidas a los ángulos de anclaje.

Con las anteriores diferencias en mente, realizamos la prueba sacando la siguiente tabla de resultados:

	F. Aleta avanzada (Kg)	F. Aleta atrasada (Kg)
Mín.	3	2.5
Máx.	3.5	3
Medio.	3.25	2.75

Tabla 5: Fuerza realizada por la pala de babor.

Este ángulo que a priori creíamos ser contraproducente para el avance de la embarcación, parece que mejora el empuje de esta.

7.3.7. Prueba con la pala de babor en el centro.

Como última prueba, decidimos cambiar la configuración de la maqueta y dotar a esta de una única pala, colocando la pala de babor (la que mayor empuje proporciona) en medio del patín



Il·lustració 62: Disposició central de la pala de Br.

Con esta configuración decidimos realizar otra vez las pruebas de tiro a punto fijo concluyendo en la siguiente tabla:

	F. Aleta avanzada (Kg)	F. Aleta atrasada (Kg)
Mín.	1.5	1.5
Máx.	3.5	2.5
Medio.	2.5	2

Tabla 6: Fuerza realizada por la aleta central.

Destacar que, con esta configuración, el cabeceo del patín queda notoriamente reducido, dotando a la maqueta de un movimiento más natural.

8. Conclusiones.

Una vez realizada la última prueba, observamos que con los elementos con los que esta ha sido construida y con los recursos invertidos en ella, hemos llegado a un punto donde para mejorar la dinámica (navegación) de esta tendríamos que cambiar de base, modificar/cambiar el mecanismo propulsor o enfocar desde otro punto de vista la propulsión con aletas verticales.

A través de la observación en las distintas pruebas realizadas podemos aportar las siguientes conclusiones para un mecanismo de propulsión con aletas verticales.

8.1. Ángulo recorrido por la pala.

En todas las pruebas el cabeceo del patín ha sido un punto importante a mejorar, y a través de la observación nos damos cuenta que, en un mecanismo de propulsión con dos aletas verticales, donde las dos palas recorren el mismo ángulo simultáneamente (90°), el cabeceo de la maqueta se vuelve más pronunciado en los últimos grados recorridos por las palas. De esta manera podemos ver que un recorrido de 90° es excesivo para una propulsión con dos aletas

verticales, ya que en los últimos tramos recorridos por las palas la mayor parte de la fuerza realizada por estas acaba resultando en el cabeceo del patín en lugar de aprovecharse para el avance.

Dicha conclusión solo puede aplicarse en el caso de tener una embarcación propulsada con dos aletas verticales, ya que, como hemos podido observar en el apartado 7.3.7. Prueba con la pala de babor en el centro, si la embarcación únicamente consta de una pala situada en su centro, el cabeceo de la maqueta se reduce notoriamente y el ángulo recorrido por la pala ya no es tan excesivo. Concluyendo en que el ángulo recorrido por la pala en una embarcación propulsada con aletas verticales vendrá determinado por el número de palas que la propulsen, necesitando un ángulo menor si tenemos más de una pala.

8.2. Anclaje de las palas.

Comparando las tablas 4 y 5 nos damos cuenta de una gran diferencia; la maqueta impulsada únicamente con la pala de babor, tiene un tiro muy superior al que tenía cuando era impulsada con la de estribor e incluso supera al tiro obtenido con las dos palas a la vez. Esto nos da un punto de vista muy interesante en cuanto al anclaje de las palas, ya que la pala de babor, como hemos podido observar en el apartado '7.3.6. Prueba con la pala de babor', está anclada con un cierto ángulo produciendo un movimiento ligeramente diferente al de la pala de estribor. Este movimiento resulta en una fuerza que puede descomponerse en tres resultantes (F_x , F_y y F_z) en lugar de dos (F_x y F_y), reduciendo ligeramente el movimiento de cabeceo, al reducirse F_y , y aumentando notablemente la fuerza de la embarcación como hemos demostrado en el ensayo 3.

8.3. Futuras vías de investigación.

La maqueta utilizada ha sido construida partiendo de unos conocimientos nulos sobre la propulsión biomimética y con un tiempo y recursos limitados. Un mecanismo propulsor con aletas verticales eficiente no tiene por qué parecerse al del modelo ensayado, ya que este es básicamente un mecanismo limpia-parabrisas, permitiéndonos experimentar con unas bases muy simples en la propulsión con aletas verticales. Como mecanismos alternativos proponemos los siguientes:

- Mecanismo donde las dos palas estén ancladas con un cierto ángulo en el plano horizontal, como en el caso de nuestra pala de babor. Además de reducir el ángulo recorrido por la pala.
- Sistema de propulsión mono-pala. Con una sola aleta central los movimientos de la maqueta, cuando el ángulo recorrido por la pala seguía siendo muy grande, esta parecía aprovechar mucho mas todo el recorrido de la pala, dando al conjunto un movimiento más natural.
- Mecanismo en el cual las dos palas realizan movimientos opuestos

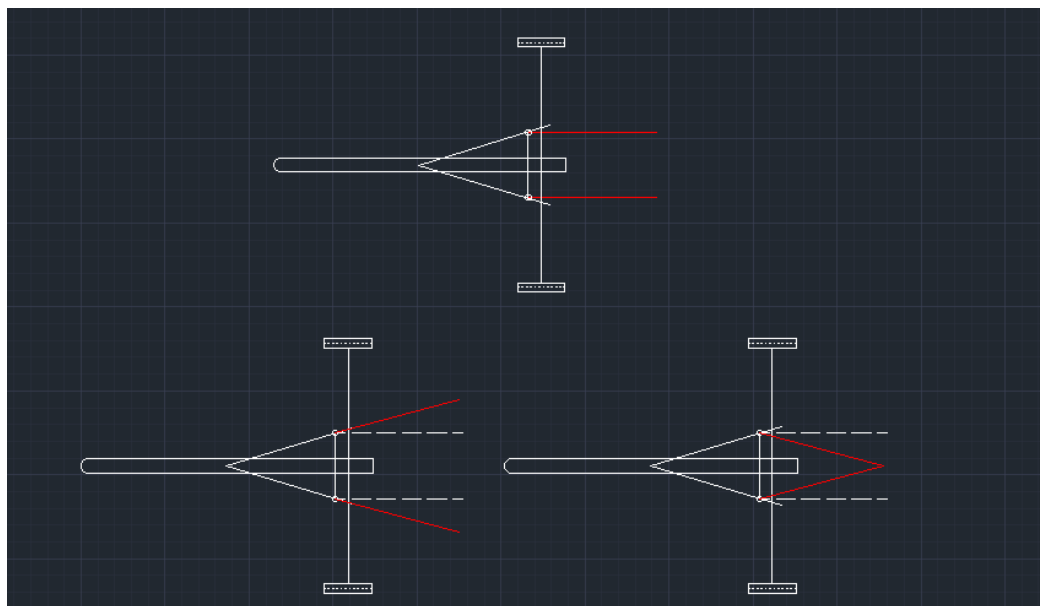


Ilustración 63: Mecanismo alternativo de aletas verticales.

Este desfase entre ambas palas permite eliminar la resultante responsable del cabeceo.

El sistema de propulsión estudiado, como los dos anteriores propuestos, dan como resultado un método de propulsión con cero cavitaciones, y, por ende, una reducción enorme de ruidos y vibraciones. También reduce notablemente las turbulencias producidas en el agua, dando como resultado una propulsión apta para navegaciones en lugares con calados restrictivos o donde las perturbaciones en el agua deban de ser mínimas, como en el caso de parques naturales o reservas.

9. Síntesis del proceso constructivo.

9.1. Observación.

En la primera etapa del proceso nos dedicamos a observar las diferentes técnicas de propulsión en los animales marinos, tales como:

- Peces; cuya propulsión se basa en aletas verticales.
- Cetáceos; usando aletas horizontales
- Buceadores; aunque no sea una clase de animal, gracias a los estudios ya hechos para la mejora de la práctica de buceo, pueden aportarnos una visión interesante desde un punto de vista biomimético.
- Moluscos; tales como calamares, estos utilizan la propulsión a chorro como método de propulsión.
- Serpientes; animales que utilizan el movimiento cinético para propulsarse.

En este punto todavía no tenemos claro el modo de propulsión a imitar, aunque por su facilidad biomimética y recursos disponibles, la propulsión mediante aletas verticales u horizontales quedan como candidatas. (**Observación morfológica. Y Análisis cinemático.**)

Finalmente decidimos optar por un mecanismo propulsado mediante aletas horizontales, ya que para una embarcación cuya navegación será superficial, una aleta en el plano horizontal parece ser la mejor opción. (**Decisiones constructivas.**)

9.2. Sistema.

Una vez observados los diferentes diseños en la naturaleza, procedemos a pensar un mecanismo cuyos movimientos imiten a los encontrados en la naturaleza. (**Tabla 1: Tipos de propulsión de los animales marinos.**)

Inicialmente optamos por construir un mecanismo simple para simular el movimiento de una aleta dispuesta en un plano horizontal. (**4.1.1. Aletas horizontales.**)

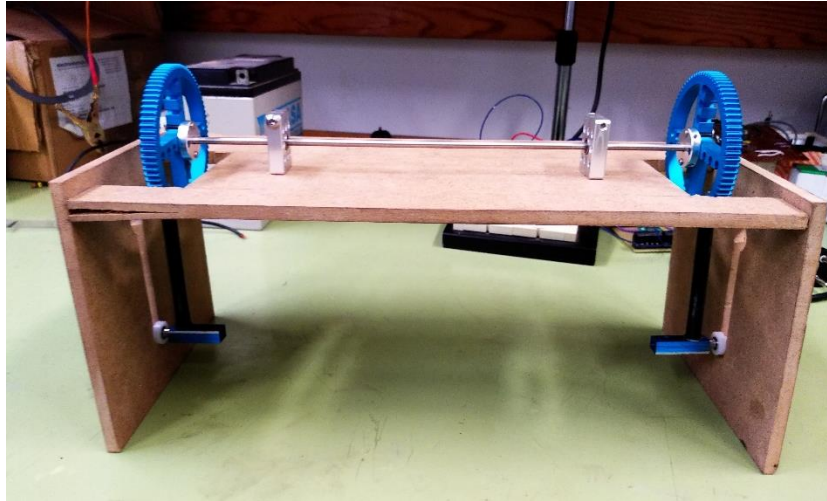


Ilustración 64: Mecanismo para la propulsión con aleta horizontal.

Tras el desarrollo del mecanismo, y las dificultades para adaptación de este a una plataforma simple y fiable para la experimentación, decidimos cambiar de mecanismo. (**4.1.2. Aletas verticales.**)

En el laboratorio de la ETSEIB disponemos de un mecanismo limpia-parabrisas, este mecanismo es más grande, más robusto y más fiable que el mecanismo que teníamos en mente, de modo que, aunque no es con el que contábamos en un principio, decidimos usarlo en nuestra maqueta. Este cambio supone pasar de una maqueta propulsada con una aleta en el plano horizontal a otra con una aleta en el plano vertical.

Al principio creíamos que la propulsión con aletas horizontales sería mucho mejor que una con aletas verticales, debido a que, en un mecanismo con una aleta horizontal, la fuerza de la aleta en la embarcación se descompondrá en una resultante favorable al avance y otra que empujará hacia arriba y abajo la embarcación. Mientras que, en una embarcación propulsada con aletas verticales, esta descomposición resultará en el avance de la maqueta y un movimiento hacia ambos lados, este último será uno de nuestros principales problemas.

9.3. Plataforma.

Esta será la base sobre la que se construirá nuestra maqueta.

Primero, destacar que el desarrollo del mecanismo de propulsión y el dimensionamiento de la plataforma son procesos que hemos desarrollado a la vez, ya que a medida que avanzamos en la fabricación del sistema, ya tenemos en cuenta las posibles plataformas disponibles.

En el laboratorio disponemos de un esquí acuático cuya geometría parece la adecuada para el proyecto, al tener unas líneas alargadas y estrecha como las de los peces, cetáceos y otros animales marinos.

Antes de pasar a la siguiente fase, debemos dimensionar las capacidades del patín. Para ello decidimos realizar una serie de pruebas de flotabilidad, situando diferentes lastres en diferentes posiciones del esquí. **(Prueba de estabilidad.)**

9.4. Primer diseño.

Una vez tenemos el mecanismo y con la plataforma debidamente dimensionada, procedemos a unir los dos componentes para crear un primer prototipo. Para ello deberemos resolver diversos problemas:

- Unir el mecanismo propulsor con la plataforma.
- Dotar al mecanismo limpia-parabrisas de aletas.
- Distribuir adecuadamente las fuerzas del propulsor sobre la maqueta.
- Añadir flotabilidad suficiente para que el conjunto flote.

Para contener los esfuerzos realizados por el mecanismo de propulsión y para que estos se repartan debidamente por la maqueta, construimos un soporte triangular sobre el que irá el sistema, y que estará sujeto a la plataforma por medio de sargentos. **(Estructura.)**

Como unión entre el mecanismo propulsor y las aletas, decidimos aprovechar los brazos del limpia-parabrisas, para ello construimos una unión entre estas y las palas de fibra de carbono disponibles en el laboratorio. **(Aletas(I).)**

Por último, construimos unas primeras reservas de flotabilidad esféricas bastante rudimentarias, aunque perfectas para conocer la reserva de flotabilidad justa requerida. **(Reservas de flotabilidad (I).)**

9.5. Ensayo 1.

Esta es la primera prueba del conjunto y tiene como objetivos principales:

- Medir experimentalmente la reserva de flotabilidad necesaria para la maqueta.
- Observar cómo se distribuyen las fuerzas para el conjunto.
- Observar los diferentes comportamientos al variar el centro de carena.

9.6. Observaciones y mejoras.

Tras el primer ensayo sacamos las siguientes conclusiones:

- La unión del mecanismo con las palas no es lo suficientemente buena.
- La maqueta necesita apoyarse fuera del agua.
- Las reservas de flotabilidad están sobredimensionadas.
- Es necesario reducir el cabeceo del patín debido a las fuerzas y momentos resultantes en las palas.

Para las que proponemos las siguientes mejoras:

- Construcción de nuevos brazos de aluminio. **(Aletas (II).)**
- Montar dos varillas a la estructura a modo de soporte cuando esta se encuentre fuera del agua.
- Construcción de una nueva reserva de flotabilidad a modo de orza, con una flotabilidad más ajustada. Está pretenderá eliminar las grandes reservas esféricas, encontrándose únicamente por debajo de la flotación del patín con el fin eliminar o disminuir el cabeceo de la maqueta, a la vez de dotar al prototipo de flotabilidad suficiente. **(Reservas de flotabilidad (II). Y Reserva de flotabilidad pasiva.)**

9.7. 7.2. Ensayo 2.

Con las nuevas mejoras procedemos a ensayar la maqueta, en esta prueba nos centraremos en:

- Observación del comportamiento tanto estático como dinámico de la maqueta con una reserva de flotabilidad a modo de orza.
- Comportamiento de los nuevos brazos de sujeción.

9.8. Observaciones y mejoras (II).

Tras ensayar la maqueta con las nuevas mejoras anotamos las siguientes observaciones:

- Distribución de pesos asimétrica.
- Prototipo inestable.
- Pequeña reducción del movimiento de cabeceo; aunque hemos ganado velocidad al disminuir dicho movimiento, sigue siendo un gran problema.

Para corregir estos comportamientos, decidimos dotar a la maqueta de otras reservas de flotabilidad laterales a modo de patines contruidos con poliestireno expandido. Estos convierten a la maqueta en un trimarán, dotándola de una mayor estabilidad, y al estar situados lo más a popa posible, tal y como explicamos en **Reservas de flotabilidad (III)**., contribuyen a reducir el cabeceo del patín.

9.9. 7.3. Ensayo 3.

En este último ensayo nos proponemos como objetivos:

- Observación del comportamiento del nuevo conjunto como trimarán.
- Medir la potencia requerida por la maqueta.
- Medir el tiro a punto fijo.

Al observar tanto el comportamiento estático como el dinámico en la nueva disposición trimarán, medir la fuerza de la maqueta con cada una de las palas por separado, e incluso reconfigurar la posición del mecanismo de propulsión a modo mono-pala. Concluimos que hemos llegado a tal punto donde las posibles mejoras a realizar, para seguir con el desarrollo del mecanismo de propulsión biomimética con aletas verticales, requieren más tiempo del que disponemos antes de presentar el trabajo. No obstante, se han trazado unas posibles futuras líneas de investigación (**Futuras vías de investigación.**), en base a los conocimientos adquiridos durante este proyecto para seguir con el desarrollo de un mecanismo de propulsión biomimética de aletas verticales.

10. Bibliografia.

- Marine biology. Function, biodiversity, ecology - Jeffrey S. Levinton//Tema II; Marine organisms: Fluid and environment aptdo6: Life in a fluid médium.
- Oceanografía biología marina y pesca – F. Lozano Cabo // capítulos IX y XII
- La vida de las aves Tomo I – Jean Dorst // Capítulo II: La locomoción terrestre y acuática.
- Manual de teoría del buque – Carlos David Verdes Jove

11. Webgrafía.

- <https://acuariodemica.es.tl/Morfologia-y-anatom%EDa-de-los-peces.htm>
- http://www.fondear.org/infonautic/Mar/Vida_Marina/Peces_Nadar/Peces_Nadar.htm
- www.botanical-online.com/animales/ballenas.htm
- www.botanical-online.com/animales/ballenas.htm
- www.acuc.es/blog/las-mejores-aletas-para-buceo/
- www.divein.com
- www.cressi.es
- www.acuc.es
- [www. peces.paradais-sphynx.com/anatomia-fisiologia/escamas-peces.htm](http://www.peces.paradais-sphynx.com/anatomia-fisiologia/escamas-peces.htm)

Anexo 1: Diseños anteriores.

En este apartado definimos por qué los diseños anteriores presentados fueron descartados.

A1.1. Primer diseño.

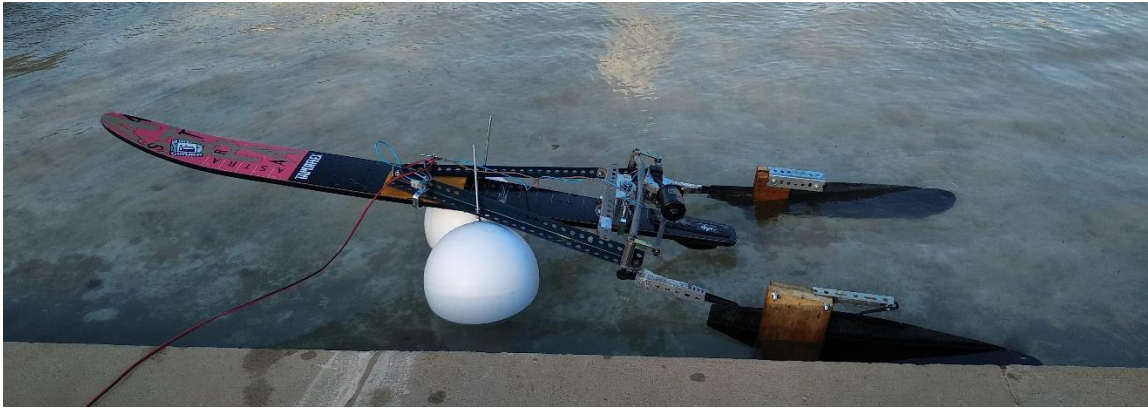


Ilustración 65A: Primer diseño.

Este estaba compuesto básicamente por:

- Reservas de flotabilidad esféricas.
- Conjunto mecanismo-estructura.
- Conjunto brazos-palas muy rudimentario.

Los principales defectos por los que el diseño tuvo que ser descartado fueron:

- Excesiva flotabilidad.
- Cabeceo del patín muy pronunciado.
- Peso del conjunto elevado.
- Conjunto brazos-aletas muy frágil.

A1.2. Segundo diseño.



Il·lustració 66A: Segundo diseño.

Con respecto al anterior, este contaba con las siguientes mejoras:

- Reserva de flotabilidad estática.
- Orza a modo de reserva de flotabilidad.
- Conjunto brazos-palas mejorado.

Los principales motivos por los que tuvimos que descartar el diseño fueron:

- Cabeceo del patín excesivo.
- Muy poca estabilidad tanto estática como dinámica.
- Conjunto brazos-aletas por mejorar.